

Technisches Grundwissen für Lehrer Allgemeine technische Grundlagen

Technisches Zeichnen
Technische Mechanik
Technische Wärmelehre
Maschinenlehre
Elektrotechnik
BMSR-Technik
Standardisierung
Fertigungstechnik
Werkstoffkunde und
-prüfung

Technisches Grundwissen für Lehrer

der polytechnischen Oberschule

Allgemeine technische Grundlagen

Technisches Zeichnen

Technische Mechanik

Technische Wärmelehre

Maschinenlehre

Elektrotechnik

BMSR-Technik

Standardisierung

Fertigungstechnik

Werkstoffkunde und
-prüfung

Herausgeber: Dr. K. Krause

4. Auflage



Volk und Wissen

Volkseigener Verlag Berlin · 1978

Autoren:

Prof. Dr. sc. H. J. Aust; Dr.-Ing. D. Böhm; Dr.-Ing. H. Fuchs; Dr. O. Hahn; H. und D. Hantke; Dr.-Ing. H. Hofmann; H. Hößler; Dr. K. Krause; Dr. E. Meißner; Prof. Dr. H. Messing †; Dr. P. Pfeiffer; Prof. Dr. habil. Dr. S. Richter; Dr. H. Schenkel; W. Schnurpel; Dr. O. Werk

4. Auflage

Lizenz-Nr. 203 · 1000/77 (BN 06 21 23 04)

LSV 06 45

Redaktion: Dr. Reinhard Behrends

Einband: Manfred Behrendt

Typografische Gestaltung: Jörg Piech vvv

Printed in the German Democratic Republic

Satz und Druck: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden













Schrift: 9/10 p Didot

Redaktionsschluß: 21. 11. 1977

Bestell-Nr. 705 192 1

DDR 16,00 M

Inhaltsübersicht

1. Einheiten und Formelzeichen	7	
2. Technisches Zeichnen	13	
3. Technische Mechanik	72	
4. Technische Wärmelehre (Grundlagen)	104	
5. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung	119	
6. Maschinenlehre	165	
7. Elektrotechnik	216	
8. Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik	287	
9. Grundbegriffe der mechanischen Technologie	330	
10. Standardisierung	368	
11. Ausgewählte ökonomische Statistiken	384	
12. Zeittafel zur Entwicklung der modernen Produktivkräfte	389	

Die einzelnen Abschnitte verfaßten:

Technisches Zeichnen:

Dr. Meißner

Technische Mechanik:

Dr. Hahm und Dr. Krause

Technische Wärmelehre (Grundlagen):

Doz. Dr.-Ing. Hofmann

Werkstoffkunde:

Dr.-Ing. Böhm und Dipl.-Gwl. Hößler

Maschinenlehre:

Dr.-Ing. Fuchs

Elektrotechnik:

Dr. Pfeiffer

Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik:

Ing. H. Hantke, Dipl.-Ing. D. Hantke

Fertigungstechnik:

Dr. Schenkel und Dipl.-Gwl. Schnurpel

Standardisierung:

Prof. Dr. habil. Messing † und Prof. Dr. sc. Aust

Ökonomische Statistiken:

Dr. Werk

Zeittafel:

Prof. Dr. habil. Richter

Fertigungstechnik — Studiendirektor Baurat Ing. Windmüller und H. Schattauer, Dipl.-Gwl. Schulze, Dr. Voigt, Dipl.-Gwl. Jüdike, Schmidt, Ing. Thomas und Ing. Schäfer sowie vielen anderen.

Die einzelnen Abschnitte bearbeiteten für die 4. Auflage:

Einheiten und Formelzeichen — Dipl.-Ing. Drachsel

Technisches Zeichnen — Dr. Seifarth und

Prof. Dr. sc. Noatnick

Technische Mechanik — Dr. Krause

Technische Wärmelehre — Doz. Dr.-Ing. Hofmann

Werkstoffkunde und -prüfung — Dr.-Ing. Böhm

Maschinenlehre — Dr.-Ing. Fuchs

Elektrotechnik — Dipl.-Ing. Hauptvogel

BMSR-Technik — Ing. Hantke und Dipl.-Ing. Hantke

Fertigungstechnik — Dr. Schenkel

Standardisierung — Prof. Dr. sc. Aust

Ökonomische Statistiken — Dr. Werk

Zeittafel — Prof. Dr. habil. Richter

Die Entwicklung des Technischen Grundwissens für Lehrer der polytechnischen Oberschule unterstützten durch ihre Hinweise zum Inhalt und zur Gestaltung:

Ing. Börner

Doz. Dr.-Ing. Hofmann

Oberstudienrat Dr. Postler

Prof. Dr. habil. Reichmann

Prof. Dr. habil. Wachner

Prof. Dr. habil. Wolffgramm

Autoren und Herausgeber sind folgenden Gutachtern für ihre kritische Einschätzung zu Dank verpflichtet:

Technische Maßeinheiten — Dr. Padelt †

Technisches Zeichnen — Dr. Seifarth, Dipl.-Gwl. Plewe

Maschinenlehre — Dr.-Ing. Böhm und Ing. Pauli

Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik — Ing.

Gottschalk

Vorwort

Aus dem Vorwort zur 1. Auflage

Das Technische Grundwissen für Lehrer der polytechnischen Oberschule enthält kurze Abrisse von technischen Wissenschaften, die für den polytechnischen Unterricht Bedeutung besitzen.

Das Technische Grundwissen wendet sich vor allem an die Lehrer und Betreuer, die den Unterricht in den Fächern Einführung in die sozialistische Produktion und Technisches Zeichnen erteilen oder die Schüler während der produktiven Arbeit am Unterrichtstag in der Produktion anleiten.

Es wird in konzentrierter Weise ein Überblick über die Grundlagen der Maschinenlehre, Elektrotechnik, Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Fertigungstechnik, Werkstoffkunde und -prüfung und des Technischen Zeichnens sowie der Thermodynamik und der Technischen Mechanik vermittelt, der durch Hinweise auf weiterführende Literatur ergänzt wird.

Die Texte sind so abgefaßt, daß sie keine größeren technischen und mathematisch-naturwissenschaftlichen Vorkenntnisse voraussetzen.

Die konzentrierte Darstellung bietet Lehrern und Betreuern ein gedrängtes Arbeitsmaterial, das von unproduktiver Sucharbeit entlasten will.

Die Autoren haben versucht, in den einzelnen Abschnitten die grundlegenden Aussagen der jeweiligen technischen Bereiche, die für den polytechnischen Unterricht bedeutsam sind, auszuwählen und darzustellen. Um den Umfang handgerecht zu halten, wurden keine unmittelbaren methodischen Aussagen aufgenommen; sie sind in der methodischen Fachliteratur zu den einzelnen Unterrichtsfächern enthalten.

Autoren, Herausgeber und Verlag sind für Anregungen und Berichtigungen dankbar. Kritische Hinweise sind zu richten an

„Volkseigener Verlag Volk und Wissen, 108 Berlin, Lindenstr. 54a, Redaktion Polytechnische Bildung“.

Berlin, Juli 1965

Herausgeber und Verlag

Vorwort zur 4. Auflage

Die einzelnen Abschnitte wurden hinsichtlich der Entwicklung in Wissenschaft und Technik durchgesehen und modernisiert. Sie entsprechen dem gegenwärtigen Stand der Standardisierung in der DDR. Die vorliegende 4. Auflage trägt insbesondere der schrittweisen Einführung des Internationalen Einheitensystems (Système Internationale d'Unités; abgekürzt SI) Rechnung. Nach TGL 31548 „Einheiten physikalischer Größen“ (Entwurf; Juni 1975) werden in den einzelnen Abschnitten SI-Einheiten bzw. mit Vorsätzen gebildete dezimale Vielfache und Teile von SI-Einheiten bevorzugt angewendet. In Verbindung mit der Einführung von Einheiten nach TGL 31548 erfolgt eine Darstellung des Zusammenhangs mit den entsprechenden bisher gebräuchlichen Einheiten durch die Angabe der Umrechnungsbeziehung (vgl. besonders Abschnitt 1. *Einheiten und Formelzeichen*).

Als Ergänzung zu den im vorliegenden Band abgehandelten Allgemeinen technischen Grundlagen erschien inzwischen Technisches Grundwissen für Lehrer — Technik und Technologie ausgewählter Industriezweige. In diesem Ergänzungsband werden in gedrängten Darstellungen die Technik und Technologie der chemischen Industrie, der metallverarbeitenden Industrie, der Landwirtschaft und des Bauwesens für die Hand des Lehrers abgehandelt.

Berlin, November 1977

Herausgeber und Verlag

1.1.3. Basiseinheiten

Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit	Bemerkungen
Meter	m	Das Meter ist gleich 1650763,73 Vakuum-Wellenlängen der Strahlung, die dem Übergang zwischen den Niveaus $2P_{1/2}$ und $5d_{3/2}$ des Atoms Krypton 86 entspricht.	
Kilogramm	kg	Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps	Vom Gramm gebildetes dezimales Vielfaches
Sekunde	s	Die Sekunde ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Cäsium 133 entspricht.	
Ampere	A	Das Ampere ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die einen Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.	
Kelvin	K	Das Kelvin ist der 273,16te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.	Siehe Abschnitt 1.1.1.
Mol	mol	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus so viel gleichartigen elementaren Teilchen besteht, wie Atome in 0,012 kg der Kohlenstoffs 12 enthalten sind.	
Candela	cd	Die Candela ist die Lichtstärke, die ein schwarzer Körper der Fläche $1/600000 \text{ m}^2$ bei der Erstarrungstemperatur des Platins beim Druck 101325 N/m^2 senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.	

1.1.4. Weitere gesetzliche Einheiten

Die folgende Übersicht ist eine *Auswahl* aus den abgeleiteten und ergänzenden SI-Einheiten und aus den sonstigen gesetzlichen Einheiten nach Entwurf TGL 31548.

Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit	Beziehung der Einheit zu den Basiseinheiten
		Fläche	
Quadratmeter	m^2	Das Quadratmeter ist die Fläche eines Quadrates von der Seitenlänge 1 m.	$1 \text{ m}^2 = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$
Hektar ¹	ha	Das Hektar ist gleich 10000 Quadratmeter	$1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$

¹ Ohne Vorsätze! Nur für Flächen von Flur- und Grundstücken.

Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit	Beziehung der Einheit zu den Basiseinheiten
Volumen			
Kubikmeter	m ³	Das Kubikmeter ist das Volumen eines Würfels der Kantenlänge 1 m.	1 m ³ = 1 m · 1 m · 1 m
Liter ²	l		1 l = 10 ⁻³ m ³
Ebener Winkel			
Radian ³	rad	Der Radian ist der ebene Winkel, der von zwei vom Mittelpunkt eines Kreises vom Radius 1 m ausgehenden Strahlen gebildet wird, die auf dem Umfang dieses Kreises einen Bogen der Länge 1 m einschließen.	1 rad = 1 m/1 m
Grad ¹	°		1° = $\frac{\pi}{180}$ rad
Minute ¹	'		1' = $\frac{\pi}{180 \cdot 60}$ rad
Sekunde ¹	"		1" = $\frac{\pi}{180 \cdot 3600}$ rad
Gon (Neugrad) ⁴	g		1 gon = $\frac{\pi}{2 \cdot 10^3}$ rad
Raumwinkel			
Steradian ³	sr	Der Steradian ist der Raumwinkel, der von einer vom Mittelpunkt einer Kugel vom Radius 1 m ausgehenden Strahlenschar gebildet wird, die auf der Oberfläche dieser Kugel die Fläche 1 m ² einschließt.	1 sr = 1 m ² /1 m ³
Zeit			
Minute ¹	min		1 min = 60 s
Stunde ¹	h		1 h = 60 min = 3600 s
Tag ¹	d		1 d = 24 h = 86400 s
Frequenz			
Hertz	Hz	Das Hertz ist die Frequenz eines periodischen Vorganges von der Periodendauer 1 s.	1 Hz = 1 s ⁻¹
Geschwindigkeit			
Meter je Sekunde	m/s	Das Meter je Sekunde ist die Geschwindigkeit eines sich gleichmäßig bewegenden Körpers, der während der Zeit 1 s den Weg 1 m zurücklegt.	1 m/s = 1 m · s ⁻¹
Beschleunigung			
Meter je Quadratsekunde	m/s ²	Das Meter je Quadratsekunde ist die Beschleunigung eines sich geradlinig bewegenden Körpers, dessen Geschwindigkeit sich während der Zeit 1 s gleichmäßig um 1 m/s ändert.	1 m/s ² = 1 m · s ⁻²

¹ Ohne Vorsätze!

² Nicht für Angaben mit einer relativen Unsicherheit $< 5 \cdot 10^{-3}$ zugelassen.

³ Die Einheiten Radian und Steradian können als abgeleitete Größen (1 rad = 1 m/1 m) aufgefaßt werden. Sie sind dimensionslos und identisch 1. Wenn es jedoch der physikalische Sachverhalt erfordert, können sie als zusätzliche Basiseinheiten angesehen werden.

⁴ Nur für Geodäsie: Gon mit Vorsätzen; Neugrad nur noch befristet zugelassen!

Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit	Beziehung der Einheit zu den Basiseinheiten
Winkelgeschwindigkeit			
Radian je Sekunde	rad/s	Der Radian je Sekunde ist die Winkelgeschwindigkeit eines gleichmäßig rotierenden Körpers, der sich während der Zeit 1 s um den Winkel 1 rad um seine Achse dreht.	$1 \text{ rad/s} = 1 \text{ s}^{-1}$
Winkelbeschleunigung			
Radian je Quadratsekunde	rad/s ²	Der Radian je Quadratsekunde ist die Winkelbeschleunigung eines Körpers, dessen Winkelgeschwindigkeit sich während der Zeit 1 s gleichmäßig um 1 rad/s ändert.	$1 \text{ rad/s}^2 = 1 \text{ s}^{-2}$
Masse			
Gramm	g		$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$
Tonne	t		$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
Dichte			
Kilogramm je Kubikmeter	kg/m ³	Das Kilogramm je Kubikmeter ist die Dichte eines homogenen Körpers, der das Volumen 1 m ³ und die Masse 1 kg hat.	$1 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ m}^{-3} \text{ kg}$
Kraft			
Newton	N	Das Newton ist die Kraft, die der Masse 1 kg in der Wirkungsrichtung der Kraft die Beschleunigung 1 m/s ² erteilt.	$1 \text{ N} = 1 \text{ m kg s}^{-2}$
Pond ¹	p		$1 \text{ p} = 0,980\,665 \cdot 10^{-2} \text{ N}$
Druck, mechanische Spannung			
Pascal	Pa	Das Pascal ist der Druck, der durch eine auf die Fläche 1 m ² senkrecht wirkende, gleichmäßig verteilte Kraft 1 N erzeugt wird.	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$
Bar ²	bar		$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
technische Atmosphäre ^{1,2}	at		$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 98\,066,5 \text{ Pa}$
physikalische Atmosphäre ^{1,2}	atm		$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$
Torr ²	Torr		$1 \text{ Torr} = \frac{101\,325}{760} \text{ Pa}$
Arbeit, Energie und Wärmemenge			
Joule (Wattsekunde, Newtonmeter)	J Ws Nm	Das Joule (die Wattsekunde oder das Newtonmeter) ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt einer Kraft von 1 N in Richtung der Kraft um 1 m verschiebt.	$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2}$
Erg ²	erg		$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
Kalorie ²	cal		$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$
Leistung			
Watt	W	Das Watt ist die Leistung eines gleichmäßig ablaufenden Vorganges, bei dem in der Zeit 1 s die Arbeit 1 J verrichtet wird.	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

¹ Ohne Vorsätze!

² Nur noch befristet zugelassen!

Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit	Beziehung der Einheit zu den Basiseinheiten
Volt	V	Elektrische Spannung Das Volt ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten die Leistung von 1 W umgesetzt wird.	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} =$ $= 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
Ohm	Ω	Elektrischer Widerstand Das Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt.	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} =$ $= 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-2}$
Siemens	S	Elektrischer Leitwert Das Siemens ist der elektrische Leitwert eines Leiters vom Widerstand 1 Ω .	$1 \text{ S} = 1/\Omega =$ $= 1 \text{ m}^{-2} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^3 \text{ A}^2$
Coulomb	C	Elektrizitätsmenge Das Coulomb ist die Elektrizitätsmenge, die während der Zeit 1 s bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A durch den Querschnitt des Leiters fließt.	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
Farad	F	Elektrische Kapazität Das Farad ist die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge 1 C auf die Spannung 1 V aufgeladen wird.	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V} =$ $= 1 \text{ m}^{-2} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$
Weber	Wb	Magnetischer Fluß Das Weber ist der magnetische Fluß, der in einer ihn umschlingenden Windung die elektrische Spannung 1 V induziert, wenn er während der Zeit 1 s gleichmäßig auf Null abnimmt.	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} =$ $= 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$
Henry	H	Induktivität Das Henry ist die Induktivität einer geschlossenen Windung, die, von einem Strom der Stärke 1 A durchflossen, den magnetischen Fluß 1 Wb umschlingt.	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} =$ $= 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$
Candela je Quadratmeter	cd/m^2	Leuchtdichte Die Candela je Quadratmeter ist die Leuchtdichte der Fläche 1 m^2 , die in Richtung der Flächennormalen mit der Lichtstärke 1 cd leuchtet.	$1 \text{ cd/m}^2 = 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{cd}$

1.1.5. Einheiten für Spezialgebiete

In einigen speziellen Bereichen der Wissenschaft und Technik sind u. a. folgende weitere Einheiten zugelassen:
 Parsec ($1 \text{ pc} = 3,08572 \cdot 10^{16} \text{ m}$);
 Elektronenvolt ($1 \text{ eV} = 1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).
 Dagegen sind Pferdestärke ($1 \text{ PS} = 735,49875 \text{ W}$) u. a. nur noch befristet zugelassen.

1.2. Allgemeine Formelzeichen nach TGL 0-1304 (Auszug)

Die nach TGL 0-1304 angegebenen Formelzeichen dienen zur Kennzeichnung physikalischer Größen. Indizes sollten nur angewendet werden, wenn mehrere Größen, für die gleiche Zeichen gelten, gleichzeitig in

Größengleichungen auftreten und unterschieden werden müssen, z. B. t_0 für die Anfangstemperatur. Das an erster Stelle angegebene Zeichen ist bevorzugt zu benutzen.

Benennung	Zeichen
<i>Länge und Winkel</i>	
Länge	l
Höhe	h
Breite	b
Halbmesser	r
Durchmesser	d
Wellenlänge	λ
Weglänge	s
Fläche	A, S
Rauminhalt	V
ebene Winkel	α, β, γ
Raumwinkel	ω, Ω
<i>Masse</i>	
Masse	m
Dichte (m/V)	ρ, d
Massenträgheitsmoment	J
Relative Atommasse (früher Atomgewicht)	A
Relative Molekülmasse (früher Molekulargewicht)	M
<i>Zeit</i>	
Zeitpunkt oder Zeitspanne	t
Periodendauer	T
Vor- oder Nacheilwinkel, Phasenverschiebungswinkel	φ
Drehzahl	n
Winkelgeschwindigkeit	ω
Frequenz	f, ν
Kreisfrequenz ($2\pi f$)	ω
Geschwindigkeit	v
Beschleunigung	a
Fallbeschleunigung	g
<i>Kraft und Druck</i>	
Kraft	F
Moment einer Kraft	M
Druck (F/A)	p
Zug- oder Druckspannung, Normalspannung	σ
Schub- und Scherspannung	τ
Elastizitätsmodul	E
Dehnung	ϵ
Reibungszahl	μ
<i>Temperatur</i>	
Temperatur	T, Θ
Celsius-Temperatur	t, θ
Längsausdehnungskoeffizient	α

Benennung	Zeichen
<i>Wärme, Arbeit, Energie</i>	
Wärmemenge	W, Q
Arbeit	W, A
Energie	W, E
Spezifische Wärme	c
Spezifische Wärme bei konstantem Druck	c_p
Spezifische Wärme bei konstantem Volumen	c_v
Verhältnis der spezifischen Wärme (c_p/c_v)	κ
Wärmeleitfähigkeit	λ
Entropie	S
Leistung	P
Gaskonstante	R
Wirkungsgrad	η
<i>Elektrische und magnetische Größen</i>	
Elektrische Stromstärke	I
Elektrische Spannung	U
Elektrischer Widerstand	R
Elektrischer Leitwert	G
Elektrizitätsmenge	Q
Elektrische Feldstärke	E
Elektrische Kapazität	C
Elementarladung	e
Elektrische Stromdichte	j, G
Blindwiderstand	X
Scheinwiderstand	Z
Spezifischer elektrischer Widerstand	ρ
Blindleitwert	B
Scheinleitwert	Y
Elektrische Leitfähigkeit	κ
Dielektrizitätskonstante	ϵ
Magnetische Feldstärke	H
Magnetische Spannung	V, U_m
Windungszahl	N
Magnetische Induktion	B
Permeabilität	μ
Magnetischer Induktionsfluß	Φ
Induktivität	L
<i>Licht</i>	
Lichtstärke	I
Lichtstrom	Φ
Leuchtdichte einer leuchtenden Fläche	L
Beleuchtungsstärke einer beleuchteten Fläche	E
Lichtgeschwindigkeit	c
Brechungszahl	n
Brennweite	f

1.3. Weiterführende Literatur

- [1] Padelt, E.; H. Laporte: Einheiten und Größenarten der Naturwissenschaften. 3. Auflage. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1976.
- [2] Bender, D.; E. Pippig: Einheiten Maßsysteme, SI. 2. Auflage. Akademie-Verlag, Berlin 1975.



2. Technisches Zeichnen

verfaßt von Dr. E. Meißner

2.1. Allgemeine Grundlagen

2.1.1. Ausführung der technischen Zeichnungen

Die technische Zeichnung ist ein Verständigungsmittel bei der Vorbereitung und Durchführung der Produktion. Nach der Art der Ausführung der technischen Zeichnungen ist zu unterscheiden zwischen

Skizzen und
Zeichnungen, darüber hinaus
gibt es Vervielfältigungen.

Skizzen. Eine Skizze ist eine einfache, meist freihändig ausgeführte Darstellung. Sie wird hauptsächlich angefertigt als *Entwurfs-skizze*, wenn eine noch nicht bis ins einzelne ausgereifte Idee, gegebenenfalls als Grundlage für eine Diskussion, festgehalten werden soll oder, wenn es notwendig ist, die ersten Gedanken als Ausgangsbasis für die weitere Arbeit zu fixieren; als *Aufnahmeskizze*, wenn bereits Vorhandenes mit einfachen Mitteln zeichnerisch festgelegt werden soll, wie es beispielsweise für Reparaturen oder zur Verständigung über die Ausführung und die

Wirkungsweise eines bestehenden Objektes notwendig werden kann.

In einer Skizze sind die Abmessungen geschätzt, die Proportionen des Objektes sollen in der Darstellung jedoch annähernd eingehalten sein. Durch die Verwendung von kariertem Papier wird das Skizzieren wesentlich erleichtert. Je nach Zweckmäßigkeit ist die axonometrische Projektion, die Darstellung in verschiedenen Ansichten, die schematische oder die sinnbildliche Darstellungsweise anzuwenden (Bild 2.1.).

Zeichnungen. Zeichnungen werden manuell unter Benutzung von Schreib- und Zeichengeräten oder maschinell durch programmgesteuerte Zeichenmaschinen ausgeführt. Grundlage stellen die in Standards festgelegten Regeln dar.

Es können Tusche- oder Bleizeichnungen sein. In der Regel werden, um Zeit zu sparen, nur Kreisbogen, Maßpfeile, Maßzahlen und Beschriftung in Tusche gezeichnet. Zeichnungen müssen das dargestellte Objekt in bezug auf alle Einzelheiten so genau wiedergeben, wie es der Zweck der Zeichnung erfordert. Soll die Zeichnung als Fertigungsgrundlage dienen, so muß sie fertigungsgerecht ausgeführt sein. Das bezieht sich hauptsächlich auf die Vollständigkeit der für die Herstellung notwendigen Angaben sowie auf die Berücksichtigung der technologischen Forderungen (Bild 2.2.).

Durch die Anwendung fotografischer Arbeitstechniken bei der Anfertigung grafischer Informationsträger können sowohl die Anschaulichkeit erhöht, als auch die Herstellung rationalisiert werden.

In der Anlagenprojektierung werden häufig die Stufen und Ergebnisse der Projektie-

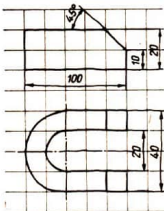


Bild 2.1.
Aufnahmeskizze
in Ansichten

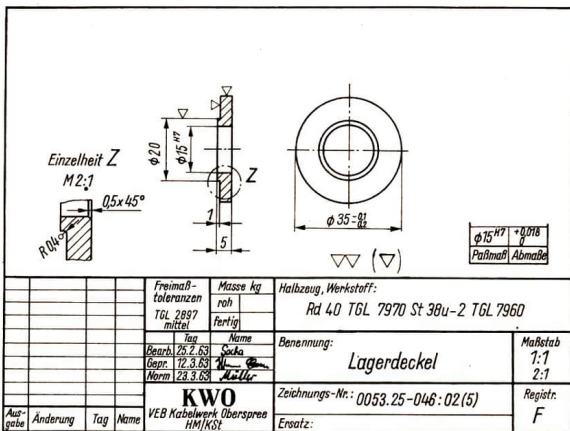


Bild 2.2.
Einzelteil-
zeichnung¹

rung mit verkleinerten Modellen durch die Fotografie dargestellt. Diese fotografischen Abbilder der Modelle werden als Modellfoto bezeichnet und stellen in der Anlagenmontage ein anschauliches und ökonomisches Arbeitsmittel dar.

In der Fotomodellprojektierung lassen sich mit zweidimensionalen Flachmodellen, die als Bausteine bezeichnet werden, auf fototechnischem Wege Zeichnungsoriginale herstellen. Die Montage der Bausteine erfolgt durch Aufkleben oder auf magnetischem Wege auf Zeichenkarton. Von diesem Original sind Filmnegative herstellbar, von denen dann Papier- oder Filmpositive angefertigt werden können.

Für die Anfertigung von Filmpositiven ist der fototechnische Film FU 31 besonders geeignet. Er ermöglicht die Herstellung von korrigierbaren, pausfähigen Zeichnungsoriginale.

Das Filmpositivverfahren wird angewendet

- zur Restauration unbrauchbar gewordener Zeichnungsoriginale,
- zur Herstellung pausfähiger Originale von Sepia- oder Lichtpausen und Druckvorlagen,
- zur Herstellung von pausfähigen Verkleinerungen und Vergrößerungen,
- zur Kombination von Zeichnung, Text und Fotografie,
- zur Herstellung von Zeichnungsbausteinen für Zeichnungsmontagen und
- bei Zeichnungsänderungen durch Abdecken der zu ändernden Stellen auf dem Negativ.

Vervielfältigungen. Für die Zeichnungsvervielfältigung sind hauptsächlich drei Gründe maßgebend:

1. Mit technischen Zeichnungen als Verständigungsmittel arbeiten viele Abteilungen des Produktionsbetriebes, z. B. die produzierende Werkstatt beziehungsweise der Bauplatz, die Planung, die Kalkulation, die Materialwirtschaft, die Technologie, die Absatzabteilung. Mög-

¹ Vorhandene Zeichnungen werden nicht umgestellt, sie enthalten noch die Oberflächenzeichen nach TGL 0-140 (s. Seite 38f.).



licherweise benötigen Besteller, Kooperationsbetriebe oder Institutionen ebenfalls Zeichnungen.

2. Die Stammzeichnung muß in sauberem Zustand erhalten bleiben, weil sie in der Regel für sich wiederholende Fertigungsaufgaben und zur Information öfter benötigt wird.
3. Die Stammzeichnung ist als Dokument zu werten und dementsprechend aufzubewahren.

Die Herstellung der Vervielfältigungen von technischen Zeichnungen kann durch Lichtpausen, Fotokopieren und im Druckverfahren erfolgen.

Während Lichtpausen nur im Maßstab 1 : 1 anzufertigen sind, können auf fotografischem Wege und beim Druckverfahren außerdem Verkleinerungen und Vergrößerungen hergestellt werden. Besondere Vorteile bietet die Mikrofilmtechnik. Auf kleinstem Raum ist die Archivierung möglich. Außerdem sind die Filmnegative über Lesegeräte sofort auswertbar, und Vergrößerungen sind in verschiedenen Maßstäben möglich.

Zeichengeräte und Zeichenzubehör. Zur Anfertigung von Skizzen genügen meist Zeichenpapier (möglichst kariert), eine einfache harte Unterlage, Zeichenstifte und Radiergummi. Zweckmäßig sind in jedem Falle zwei *Zeichenstifte* unterschiedlicher Härte (F oder HB für breite

Linien; H, 2H oder 3H für schmale Linien).¹ Zum Schärfen der Mine wird ein Stück Schleifpapier (evtl. auf eine harte Unterlage geklebt) oder eine Schlichtfeile benötigt. Um gleichmäßige Linienbreiten zu erreichen, ist es vorteilhaft, die Mine anzuflachen. *Radiergummi* müssen weich sein und dürfen nicht schmieren. Es soll möglichst wenig radiert werden.

Für das Anfertigen exakter Zeichnungen wird das Zeichenblatt auf einem *Reißbrett* oder dem Brett einer *Zeichenmaschine* befestigt. Für den polytechnischen Unterricht bietet der Handel Reißbretter für A4-Hochformat mit Klemmschiene oder Reißschiene an. Zum Linienziehen dienen *Reißschiene* und zwei unterschiedliche *Zeichendreiecke* ($45^\circ/45^\circ/90^\circ$ und $30^\circ/60^\circ/90^\circ$). Durch Anwendung eines Zeichendreiecks oder Zusammenlegen beider Zeichendreiecke lassen sich alle Winkel von 15° zu 15° zeichnen (Bild 2.5.). Zeichenmaschinen sind mit einem drehbaren Zeichenkopf ausgerüstet, auf dem eine Gradeinteilung mit Nonius angebracht ist, wonach die rechtwinklig befestigten Lineale geschwenkt werden können. Zum Abmessen ist ein *Maßstab* notwendig. Um Parallaxen zu vermeiden, werden solche mit dreieck-ähnlicher Querschnittsgrundform und Millimeterteilung angewendet. Vorteilhaft sind Reduziermaßstäbe. Sie ersparen das Rechnen beim Zeichnen im Verkleinerungsmaßstab.

Das Zeichnen von Kreisen und Kreisbogen geschieht mit dem *Zirkel*, der mit einem Mineneinsatz oder einem Ziehfedereinsatz (für Tuscharbeiten) versehen werden kann. Für kleine Kreise und Kreisbogen findet der Nullenzirkel



Bild 2.3. Flexibles Kurvenlineal

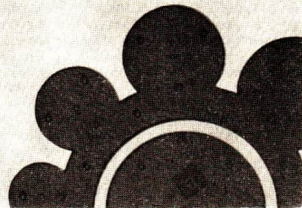


Bild 2.4. Radienschablone

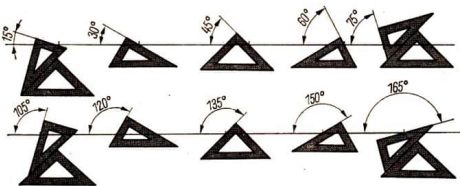


Bild 2.5.
Zusammenlegen
der Zeichendreiecke

¹ siehe Seite 18f.

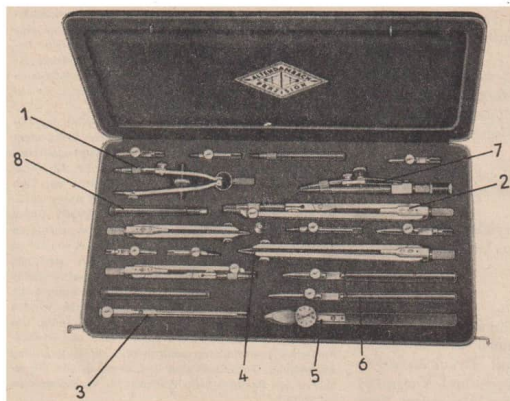


Bild 2.6.
Reißzeug: 1 Teilzirkel;
2 Zirkel; 3 Verlängerung;
4 Stechzirkel; 5, 6 Zieh-
federn; 7 Nullenzirkel;
8 Schraubenzieher

Anwendung. Zum Übertragen gleicher Maße ist der Teilzirkel (auch Stechzirkel genannt) geeignet. Zum Reißzeug gehört außer den verschiedenen Zirkeln mit Zubehör auch die Ziehfeder zum Nachzeichnen der Konturen mit Tusche (Bild 2.6.).

Die Zeichenarbeit kann mit Hilfe von *Kurvenlinealen* oder *Schablonen* für bestimmte Formen und Schriften erleichtert werden (Bilder 2.3. und 2.4.). Außerdem finden *Zentrierschablonen* als Auflagen für die Zirkelspitze beim Zeichnen konzentrischer Kreise sowie *Glashaarpinsel* zum Radieren in Tuschezeichnungen und *Radier-schablonen* für Bleistiftzeichnungen Anwendung.

Zum Schreiben mit Tusche stehen *Kugelspitz-* oder *Plättchenfedern* für verschiedene Strichdicken zur Verfügung. Übliche Werkzeuge zum Schreiben und Zeichnen sind auch *Tuschefüllhalter* der Systeme „Lineator“ und „Skrivent“.

Zeichnungsformate. Die Abmessungen und Kurzbezeichnungen der Zeichnungsformate

Kurzbezeichnung nach TGL 31031/02	Abmessungen	Kurzbezeichnung nach TGL 0-476
4 4	1189 × 841	A 0
2 4	594 × 841	A 1
2 2	594 × 420	A 2
1 2	297 × 420	A 3
1 1	297 × 210	A 4

Übersicht 2.7.a: Hauptformate für das Zeichnungsblatt

sind in TGL 31031/02 festgelegt. Für die Hauptformate, die vorzugsweise zu verwenden sind, gilt außerdem die Kurzbezeichnung nach TGL 0-476; Reihe A (Übersicht 2.7.a).

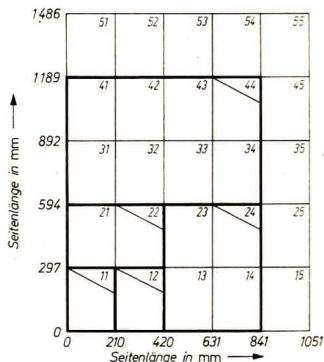


Bild 2.7.b Bildungsgesetz und Kurzbezeichnung für Formate (In TGL 31031/02 wird das Diagramm bis Format 3270 × 2102 geführt.)



Gezeichnet	(Tag)	(Name)	(Schule)	(Klasse)	25
Gepflicht	(Tag)	(Name)		(Blatt-Nr.)	
Maßstab	(Benennung)				15
					30
185					
20	20	50			

Bild 2.8.a Vereinfachtes Schriftbild für den polytechnischen Unterricht

65	8	20	12	Halbzeug/Werkstoff	zul. Abw. für Maße ohne Toleranzang.	spez. Hinweise	15	20			
									Benennung	Maßstab	Bauweise
5								40			
8-5-40											
5-4-20											
4											
								90			
								185			

Bild 2.8.b Schriftbild nach TGL 31006

Auf der Grundlage des Formates A 4 werden alle anderen Formate durch Vervielfachen der Seitenlängen 297 mm und 210 mm gebildet. Das entsprechende Bildungsgesetz und die Kurzbezeichnung für Formate werden in Bild 2.7.b dargestellt. Die Hauptformate sind durch breite Volllinien gekennzeichnet; die Kurzbezeichnung

ist jeweils in der rechten oberen Ecke des Formates eingetragen. Die Kurzbezeichnung eines Formates wird aus zwei Ziffern gebildet, die als ganzzahlige bzw. angenähert ganzzahlige Faktoren zu betrachten sind. Die erste Ziffer multipliziert mit der Seitenlänge 297 mm und die zweite Ziffer multipliziert mit der Seitenlänge

Bild 2.9. Aufbau der Mittelschrift nach TGL 31034/01 (Auszug) (h = Nennhöhe; c = Höhe der Kleinbuchstaben; d = Überhöhung, die durch Rundungen entsteht; g = Grundbreite der Buchstaben und Ziffern; s = Strichbreite)



210 mm geben entsprechend dem Bildungsgesetz Vielfache dieser grundlegenden Seitenlängen an. So hat beispielsweise das Format *I1* die Seitenlängen 297 mm ($I \times 297$ mm) und 210 mm ($I \times 210$ mm); das Format *44* hat die Seitenlängen 1189 mm (ca. 4×297 mm) und 841 mm (ca. 4×210 mm).

Zeichnungsschriftfeld. Erläuternde Angaben, die die ganze Zeichnung betreffen, werden im Schriftfeld untergebracht. Jede Zeichnung ist mit einem Schriftfeld zu versehen. Für die Hauptformate *I1* (A 4) und *I2* (A 3) ist das Schriftfeld nach Bild 2.8.b anzuwenden.¹

Für Schulzwecke sind nicht alle Angaben, die das standardisierte Schriftbild vorsieht, erforderlich. Es ist ein vereinfachtes Schriftfeld nach Bild 2.8.a ausreichend.

Beschriftung. Für die Beschriftung von Konstruktionsdokumenten wird die in TGL 31034/01 bis /05 festgelegte Schrift verwendet. Sie kann nach dem Schrifttyp als *Mittelschrift* oder *Engschrift* mit der Neigung *senkrecht* oder *schräg* ausgeführt werden (Bild 2.9.). In einer Zeichnung soll der gewählte Schrifttyp, mindestens jedoch die Neigung der Schrift übereinstimmen. Für die Beschriftung können Hilfsnetze oder Schablonen verwendet werden.

Nennhöhe *h* und Strichbreite *s* sind nach Übersicht 2.10. auszuwählen. Die zulässige kleinste Nennhöhe ist in Abhängigkeit vom

<i>h</i>	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0	20,0
<i>s</i>	0,25	0,35	0,50	0,70	1,0	1,4	2,0

Übersicht 2.10.: Hauptabmessungen der Mittelschrift

beabsichtigten Abbildungsverhältnis bei der reprografischen Verarbeitung (z. B. Mikroverfilmung) nach Übersicht 2.11. zu bestimmen.

¹ Vorhandene Zeichnungen werden nicht umgestellt und enthalten Schriftfelder nach TGL 0-6771, Bl. 1 und Bl. 2.

Abbildungsverhältnis	1:4	1:1,4	1:2	1:2,8
Nennhöhe	2,5	3,5	5,0	7,0

Übersicht 2.11.: Minimale Nennhöhe der Schrift

Die Schriftform wird nach TGL 31034/02 bis /05 ausgeführt. Die Mittelschrift, senkrecht (Bild 2.12.), ist in Abstimmung mit dem ASMW für den Bereich der polytechnischen Oberschule, insbesondere im polytechnischen Unterricht, vorzugsweise anzuwenden.²

Linien. Linienarten, Linienbreiten und ihre Ausführung sind nach TGL 31033/01 standardisiert. In diesem Standard sind die Anforderungen der Mikroverfilmung berücksichtigt. Die *Linienarten* sind in der Übersicht 2.13. dargestellt. Die *Linienbreite* *s* ist nach Übersicht 2.14. auszuwählen. Ihre Reihe ergibt sich aus der Stufung mit dem Faktor $\sqrt{2}$.

Eine *Liniengruppe* wird durch Auswahl von vier Linienbreiten (schmal, mittelbreit, breit, sehr breit) gebildet. Ihre Benennung erfolgt nach dem Typ der Stufung der ausgewählten Linienbreiten und der Breite der schmalen Linie. Die Liniengruppe ist u. a. in Abhängigkeit von den Abbildungsverhältnissen bei der reprografischen Verarbeitung auszuwählen (Übersicht 2.15.).

In Zeichnungen, die mit Ziehfedern oder Bleistift angefertigt werden, ist das Verhältnis der Linienbreiten unbedingt einzuhalten. Die Linienbreiten sind dagegen annähernd einzuhalten.

Maßstäbe. Die Gegenstände sind auf technischen Zeichnungen vorzugsweise in natürlicher Größe, also im Maßstab 1:1 darzustellen. Bei erforderlichen Vergrößerungen bzw. Verkleinerungen werden Maßstäbe nach TGL 31032 angewendet. Unter dem Begriff Maßstab wird dabei das Ver-

² Alle Abbildungen im vorliegenden Titel sind noch nach TGL 0-16 „Schräge Schrift für Zeichnungen“ beschriftet.



Benennung	Darstellung
Vollinie	
Strichlinie	
Punktlinie	
Strichpunktlinie	
Strichpunktstrichlinie	
Linie mit Zeichen, Ziffern, oder Buchstaben	
Linie mit Zickzack	
Freihandlinie	

Bild 2.12. Buchstaben des lateinischen Alphabets und Ziffern und Zeichen in Mittelschrift, senkrecht, nach TGL 31034/02 bzw. /05 (Auszug)

Übersicht 2.13.: Linienarten

s 0,18 0,25 0,35 0,5 0,7 1,0 1,4 2,0

Übersicht 2.14.: Linienbreiten

hältnis der Länge einer Strecke in der Zeichnung zur Länge der entsprechenden Strecke in der natürlichen Größe verstanden.



Abbildungsverhältnis	Linienbreite					Liniengruppe			Kurzzeichen
	0,18	0,25	0,35	0,5	0,7	1,0	1,4	2,0	
1:1	0,18	0,25	—	0,5	—	1,0	—	—	A 0,18
1:1,4	—	0,25	0,35	—	0,7	—	1,4	—	A 0,25
1:2	—	—	0,35	0,5	—	1,0	—	2,0	A 0,35
1:2,8	—	—	—	0,5	0,7	—	1,4	—	A 0,5

Übersicht 2.15.: Liniengruppen des Stufungstyps A (Beispiel)

Vergrößerungsmaßstäbe	50:1	10 ⁿ :1	—
	5:1	10 :1	20:1
	—	—	2:1
Natürliche Größe		1:1	
Verkleinerungsmaßstäbe	1:2	—	—
	1:20	1:10	1:5
	1:200	1:100	1:50
	1:(2 × 10 ⁿ)	1:10 ⁿ	1:(5 × 10 ⁿ)

Übersicht 2.16.: Maßstäbe der Hauptreihe (n = ganze Zahl)

Die Maßstäbe der Hauptreihe nach Übersicht 2.16. sind vorzugsweise anzuwenden.

Im Schriftfeld der Zeichnung wird der Maßstab der Hauptdarstellung ohne Buchstabenangabe bezeichnet. Maßstäbliche Darstellungen auf der Zeichnung, die vom Hauptmaßstab abweichen, erhalten nur über der entsprechenden Darstellung die Angabe des Maßstabes mit dem Buchstaben „M“ (z. B. M 5:1).

2.1.2. Hauptverfahren der Darstellung von Gegenständen

Für die maß- und formgerechte Darstellung von Gegenständen in technischen Zeichnungen haben sich zwei Arten der Parallelprojektion durchgesetzt:

1. die axonometrische Projektion,
2. die rechtwinklige Parallelprojektion.

Einzelheiten beider Darstellungsarten sind in Standards der DDR enthalten.

Für die Verständigung über schwierig zu zeichnende Konturen (z. B. Gewinde, Zahnflanken bei Zahnradern) sowie über Wirkungsweise und Energiefluß (Elektrizität, Gas, Flüssigkeit) in Geräten oder Anlagen ist die sinnbildliche Darstellung gebräuchlich. Beispiele solcher Darstellungen sind Pläne für elektrische Anlagen sowie für Gas-, Wasser- und Heizungsanlagen.

Axonometrische Projektion. Im technischen Zeichnen hat diese Art der Parallelprojektion eine gewisse Bedeutung, weil sie anschauliche Abbildungen ergibt, bei denen alle parallelen Kanten am Gegenstand auch parallel dargestellt sind. Bei der axonometrischen Projektion werden die darzustellenden Gegenstände in ein räumlich-rechtwinkliges Achsenkreuz projiziert. Für die Anfertigung von Konstruktionsdokumenten sind in TGL 31035/02 zwei orthogonale und eine schiefwinklige axonometrische Projektion standardisiert (Übersicht 2.17.):

Die *orthogonale isometrische Projektion* wird für Darstellungen angewendet, bei denen in drei Ansichten Wesentliches gezeigt werden soll. Sie wird im Anlagenbau bevorzugt genutzt.

Die *orthogonal dimetrische Projektion* ist anzuwenden, wenn in der Hauptansicht Wesentliches gezeigt werden soll. Sie wird als Angebotszeichnung bevorzugt.

Die *schiefwinklige frontal-dimetrische Projektion* bietet den besonderen Vorteil, daß in der Hauptansicht keine Verzerrungen



Bezeichnung	Lage der Achsen und Zuordnung der Maßstäbe	Darstellungsbeispiel
Orthogonale isometrische Projektion		
Orthogonale dimetrische Projektion		
Schiefwinklige frontal-dimetrische Projektion		

Übersicht 2.17.: Axonometrische Projektionen nach TGL 31 035/02

auftreten. Der günstige Verzerrungsmaßstab von 1:2 bei einem Winkel von 45° macht diese Parallelprojektion für das Skizzieren besonders vorteilhaft.

Für den Bereich des polytechnischen Unterrichts wird in Abstimmung mit dem ASMW eine begriffliche Vereinfachung vorgenommen. Danach sind die axonometrischen Projektionen wie folgt zu benennen: isometrische Projektion; dimetrische Projektion; frontal-dimetrische Projektion.

Rechtwinklige Parallelprojektion. Weil die technische Zeichnung als wichtiges Verständigungsmittel bei der Vorbereitung und Durchführung der Fertigung dient, muß sie, um Irrtümer und damit Produktionsverluste zu vermeiden, eindeutige Darstellungen enthalten. Die Darstellungen nach der axonometrischen Projektion werden dieser Forderung vor allem bei komplizierten

Werkstücken nicht in jedem Falle gerecht. Eine übersichtliche Maßeintragung ist hier häufig schwierig. Die übliche Darstellungsweise ist daher die rechtwinklige Projektion verschiedener Ansichten des Werkstückes auf Projektionsebenen, die zu den jeweiligen Ansichten parallel liegend gedacht sind (Bild 2.18.).

Die Anordnung der Ansichten auf dem Zeichenblatt ergibt sich durch Umlappen der um das Werkstück herum gedachten Projektionsebenen in die Zeichenebene (Bild 2.18.).

Die gleiche Anordnung der Ansichten ergibt sich auch durch Drehen des Werkstückes derart, daß die jeweilige Ansicht parallel zur Zeichenebene zu liegen kommt und vom Beschauer aus vorn liegt (Bild 2.19.a und b).

Die Benennung der Ansichten entspricht der Blickrichtung auf das Werkstück. Danach ist zu unterscheiden zwischen:

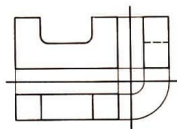


Bild 2.18. Projektion der Ansichten

- V – Vorderansicht
- D – Draufsicht
- S_l – Seitenansicht von links
- S_r – Seitenansicht von rechts
- U – Untersicht
- R – Rückansicht

Als *Vorderansicht* wird die Ansicht gewählt, die am meisten über die Gestalt des Werkstückes aussagt. Es werden nur so viel Ansichten gezeichnet, wie zum eindeutigen Erkennen der Form notwendig sind. Mitunter genügt eine Ansicht, um in Verbindung mit der Maßeintragung die Form eindeutig auszuweisen.

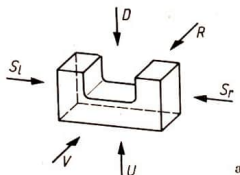
Der darzustellende Gegenstand kann entweder in der

Fertigungslage oder in der
Gebrauchslage

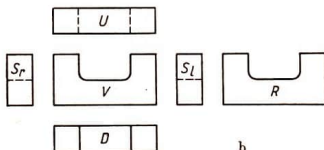
gezeichnet werden. Unter *Fertigungslage* ist die Anordnung des Gegenstandes zu verstehen, in der er sich beim Herstellungsprozeß während der hauptsächlichsten Arbeitsoperationen befindet. Die *Gebrauchslage* ist die Anordnung des Gegenstandes während seiner Anwendung (im Gebrauch).

Einzelteile werden meist in der *Fertigungslage*, komplette Erzeugnisse meist in der *Gebrauchslage* dargestellt.

Fertigungslage und *Gebrauchslage* können übereinstimmen. Im Regelfall wird der Endzustand dargestellt. Muß in begründeten Fällen der Ausgangszustand gezeichnet werden, z. B. ein Rohteil, so ist die Andeutung des Endzustandes in derselben Darstellung oft zweckmäßig und zulässig (Bild 2.25.). Wenn der gleiche Ausgangszustand für mehrere Endzustände benötigt wird, so sind gesonderte Darstellungen vorzusehen.



a



b

Bild 2.19.a Betrachtungsrichtung der 6 Ansichten

b Anordnung der 6 Ansichten nach

TGL 9727/01

Sinnbildliche Darstellung. Es ist zu unterscheiden zwischen

vereinfachten Darstellungen und
sinnbildlichen Darstellungen.

Bei vereinfachten Darstellungen sind bestimmte, schwierig zu zeichnende Konturen (z. B. Gewindeprofile, Zahnprofile bei Verzahnungen) sinnbildlich vereinfacht in sonst maß- und formgerechte Darstellungen eingezeichnet.

Bei sinnbildlichen Darstellungen sind die Gegenstände insgesamt durch Sinnbilder erklärt. Die genauen Formen und Abmessungen bleiben dabei unberücksichtigt. Es kommt darauf an, die Gegenstände als Bestandteile eines Ganzen in ihrem Zusammenwirken oder in ihren Beziehungen zueinander zu zeigen. Die Sinnbilder sollen die Gegenstände sinnfällig charakterisieren (Bilder 2.20.a und b). Diese Darstellungsweise findet u. a. in Schaltplänen der Elektrotechnik, bei Rohrleitungsplänen, schematischen Darstellungen des Maschinen- und Gerätebaus Anwendung.



2.2.2. Werkstücke mit runder Grundform

Bei drehsymmetrischen Formen ist durch eine Mittellinie oder ein Mittellinienkreuz (schmale Strichpunktlinie) auf die Symmetrie hinzuweisen. Bei sehr kleinen Formen darf in der Draufsicht ein Kreuz aus schmalen Volllinien gezeichnet werden.

Ebene Flächen an Zylindern (Bild 2.24.):

- waagerechte Fläche; es verändert sich lediglich die Höhe,
- senkrechte Fläche; es entsteht eine ebene Fläche in Längsrichtung,
- schräge Fläche, 30° geneigt,
- schräge Fläche, 45° geneigt; die ellipsenförmige Schnittfläche erscheint in der Vorderansicht als Kreis,
- schräge Fläche, 60° geneigt. Schräg zur Projektionsebene liegende Flächen er-

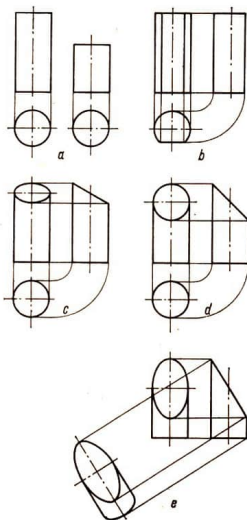


Bild 2.24. Zylinderschnitte

scheinen in der Darstellung nicht in natürlicher Form und Größe. Die natürliche Form und Größe der Fläche sind nur zu erhalten, wenn die Projektionsebene parallel zur ebenen Fläche am Zylinder gedreht bzw. die Blickrichtung senkrecht auf die Fläche gerichtet wird.

Ebene vierseitige Flächen an Drehkörpern müssen, wenn nur eine Ansicht vorhanden ist, durch ein *Diagonalkreuz* (schmale Volllinien) kenntlich gemacht werden. Bei Vorhandensein mehrerer Ansichten kann das geschehen (Bild 2.26.a).

Die runde Querschnittsform der Einschnitte ist hier durch Einzeichnen der verdeckt liegenden Umrißkante (Strichlinie) erkennbar gemacht. Bei der bemaßten Darstellung erübrigt sich das, weil bei runden Formen vor der Maßzahl in jedem Falle das Durchmesserzeichen \varnothing gesetzt werden muß (siehe Abschnitt 2.2.4.).

In Bild 2.26.b wird die *gestreckte Länge* (Ausgangszustand) durch eine Strichpunktlinie dargestellt.

Bild 2.25.a zeigt einen Schmiederohling. In den Ausgangszustand sind die Hauptkonturen des Endzustandes durch schmale Strichpunktlinien eingezeichnet.

Bei Löchern, die auf einer gedachten Kreislinie angeordnet sind, wird der Lochkreis in schmalen Strichpunktlinien eingezeichnet (Bild 2.25. b).

Kanten, die bei Durchdringungen entstehen, werden als breite Volllinien gezeichnet. Abgerundete Übergänge werden durch Lichtkanten angedeutet (Bild 2.26.c).

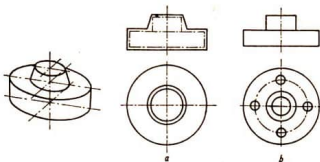


Bild 2.25. Flansch; a Schmiederohling; b Fertigteil

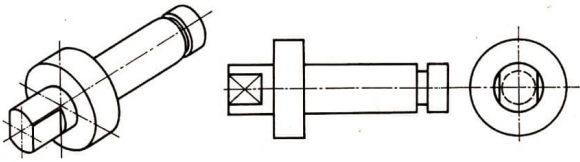


Bild 2.26.a Achse

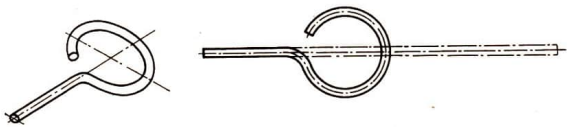


Bild 2.26.b Öse

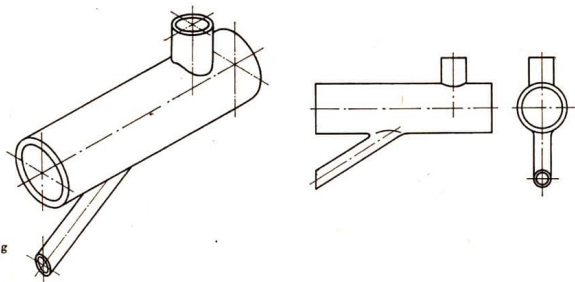


Bild 2.26.c
Rohrverzweigung

2.2.3. Schnittdarstellungen

Schnittdarstellungen sind notwendig, um Innenkonturen deutlich zu zeigen. Man denkt sich den Gegenstand aufgeschnitten und stellt ihn so dar, als wäre der zum Beschauer vorn liegende, abgeschnitten gedachte Teil fortgenommen. Dadurch werden sonst verdeckte Kanten sichtbar und dementsprechend als breite Volllinien dargestellt. Hinter der Schnittfläche verdeckte liegende Kanten sind nicht einzuzichnen. Die Schnittflächen kennzeichnet man durch eine Schraffur (im Normalfalle unter 45°

geneigte schmale Volllinien). Der Abstand der Schraffurlinien richtet sich nach der Größe der Darstellung. Alle Schnittflächen eines Einzelteiles erhalten Schraffurlinien gleichen Abstandes und gleicher Richtung. Sehr schmale Schnittflächen werden voll geschwärzt. Stoßen solche Schnittflächen in der Darstellung zusammen, so bleibt zwischen ihnen eine Fuge. Je nach Notwendigkeit vom Standpunkt der eindeutigen Darstellung werden einzelne oder alle Ansichten als Schnittdarstellungen gezeichnet. Die standardgerechte Anordnung der Ansichten bleibt dabei unverändert.



Schnittarten:

1. in bezug auf die Lage der gedachten Schnittebene zur Werkstücklage: Längsschnitt – Querschnitt,
2. in bezug auf die Größe des weggeschnittenen gedachten Werkstückteiles: Vollschnitt, Halbschnitt, Teilschnitt.

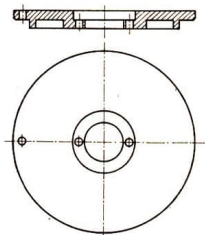


Bild 2.27. Tischring (TGL 28-56)

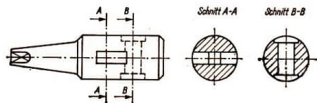


Bild 2.28. Bohrmesseraufnahme mit Spiralkeileinspannung



Bild 2.29. Nutachse

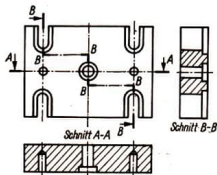


Bild 2.30. Grundplatte

Darstellungsbeispiele.

Bild 2.27.: *Vorderansicht im Schnitt*. Die gedachte Schnittebene fällt mit der waagerechten Mittellinie in der Draufsicht zusammen und braucht, da das eindeutig aus der Darstellung hervorgeht, nicht besonders gekennzeichnet zu werden.

Bild 2.28.: *Zwei Seitenansichten von links im Schnitt — Vollschnitt/Querschnitt*. Wenn die Eindeutigkeit es erfordert, sind die gedachten Schnittebenen durch schmale Strichpunktlinien mit kurzen breiten Strichen an den Enden zu kennzeichnen. Bei mehreren Schnitten ist eine Buchstaben-Kennzeichnung anzuwenden (gleiche Großbuchstaben vom Anfang des Alphabets für einen Schnitt). Die Schnittdarstellungen sind in solchen Fällen entsprechend zu bezeichnen (z. B. Schnitt A—A).

Bild 2.29.: *In Vorderansicht eingezeichneter Schnitt — Vollschnitt/Querschnitt*. Das Einzeichnen einer Schnittdarstellung in eine Ansicht an der Stelle, für die der Schnitt gilt, ist mitunter zweckmäßig, um eine Ansicht einzusparen. Die Umrißlinien der eingezeichneten Schnittdarstellung sind in diesem Falle schmale Volllinien.

Bild 2.30.: *Draufsicht: Vollschnitt/Längsschnitt. Seitenansicht: Vollschnitt/Querschnitt*. Geknickte Schnittverläufe sind zweckmäßig, wenn mehrere Innenkonturen, die in verschiedenen Schnittebenen liegen, in einer Schnittdarstellung gezeigt werden sollen. Die Knickstellen sind durch sehr breite Linienstücke hervorzuheben und, wenn die Eindeutigkeit es erfordert, mit gleichen Großbuchstaben zu kennzeichnen.

Schnittebenen, die zur waagerechten oder senkrechten *Schnittebene geneigt* liegen, denkt man sich bei der Darstellung in eine dieser normalen Schnittebenen zurückgedreht (Bild 2.31.).

Halbschnitte sind eine Kombination von Ansicht- und Schnittdarstellung bei symmetrischen Werkstücken. Sie entstehen dadurch, daß man sich ein Viertel des Gegenstandes (im Regelfall rechts oder unterhalb

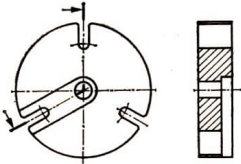


Bild 2.31. Transportplatte

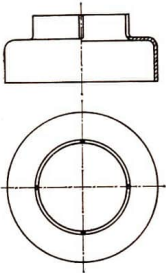


Bild 2.32. Schutzglocke

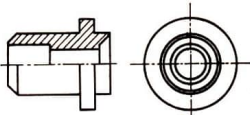


Bild 2.33. Buchse

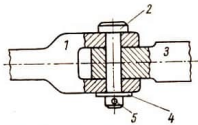


Bild 2.34. Bolzenkupplung (Baugruppe)

der Mittellinie) herausgeschnitten denkt. Die Mittellinie ist Trennlinie zwischen Ansicht und Schnittdarstellung. Eine besondere Kennzeichnung des Überganges erfolgt nicht (Bilder 2.32. und 2.33.).

Vorteile: Platz- und Arbeitszeiteinsparung. *Teilschnitte* sind zulässig, wenn der Zweck der Schnittdarstellung damit erreicht wird. Die Abgrenzung des Teilschnittes erfolgt durch schmale Freihandlinien (Bild 2.34.). In Fällen wie Bild 2.35. ist eine Begrenzung durch eine Freihandlinie nicht notwendig. Eine vergrößerte Darstellung des herausgezeichneten Teilschnittes in einem standardisierten Maßstab ist zulässig.

Aneinanderstoßende Schnittflächen bei zusammengebauten Teilen sind verschieden gerichtet zu schraffieren. Grenzen Schnittebenen von mehr als zwei Teilen aneinander, können diese auch durch verschiedenen Abstand der Schraffurlinien voneinander unterschieden werden. Von der Schnittdarstellung in Längsrichtung sind ausgenommen: Schrauben, Stifte, Bolzen, Niete usw.; Wellen, Lagerzapfen; Arme, Rippen, Verstärkungen; Kettenglieder, Kugellagerkugeln. Diese Konstruktionselemente sind, auch wenn sie in der gedachten Schnittebene liegen, ungeschnitten darzustellen (Bild 2.34.).

Bruchlinien. Lange Gegenstände und große symmetrische Körper dürfen unterbrochen oder abgebrochen gedacht dargestellt werden, um Platz einzusparen (Bild 2.36.). Bedingung: Zwischen den Bruchstellen oder hinter der Bruchstelle darf die Form des dargestellten Gegenstandes sich nicht ändern.

2.2.4. Bemaßung


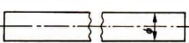

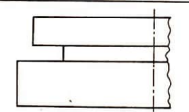
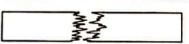
2.2.4.1. Elemente der Bemaßung

Maßhilfslinien. Schmale Volllinien als Verlängerung der zu bemaßenden Körperkanten ragen etwas über die Maßpfeile hinaus. Sie sind notwendig, wenn das Maß nicht zwischen den Körperkanten eingetragen, sondern wegen besserer Übersichtlichkeit herausgezogen werden soll.

Maßlinien. Schmale Volllinien, meist rechtwinklig zwischen den sichtbaren Körperkanten oder parallel zur anzugebenden Abmessung.

Maßpfeile. An den Enden der Maßlinien ge-



	Gegenstände mit prismatischem Querschnitt
	Gegenstände mit rundem Querschnitt
	rohrartige Gegenstände
	große symmetrische Gegenstände
	Gegenstände aus Holz

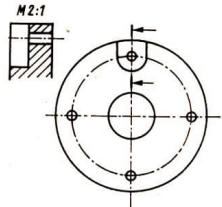


Bild 2.35. Scheibe (Teilschnitt im Vergrößerungsmaßstab)

Bild 2.36. Bruchlinien nach TGL 9727, Blatt 1

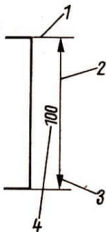


Bild 2.37. Elemente der Bemaßung: 1 Maßhilfslinie; 2 Maßlinie; 3 Maßpfeil; 4 Maßzahl

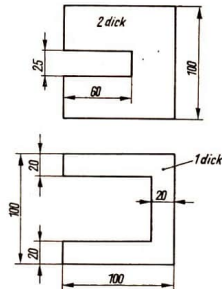


Bild 2.38. Bemaßung von geraden Konturen

schwärzte spitzwinklige Dreiecke (spitzer Winkel 15°, Länge der Pfeile etwa fünffache Strichdicke). Ist wenig Platz vorhanden, dürfen die Maßpfeile von außen an die Maßhilfslinien angesetzt werden. Wenn für Maßpfeile kein Platz vorhanden ist, dürfen sie durch Punkte ersetzt werden (Bild 2.59.). **Maßzahlen.** Maßzahlen geben die Abmessungen in Millimetern an. Abweichungen hiervon müssen durch Angabe der Einheit erkenntlich sein.

In der Regel sind die Maßzahlen über die Maßlinie geschrieben. Die Schriftgröße ist nach dem Abbildungsverhältnis bei der reprografischen Weiterverarbeitung auszuwählen (vgl. S. 18). Maßangaben dürfen nicht durch Linien getrennt oder geschnitten werden. Sie müssen bezogen auf die Darstellung von unten oder von rechts lesbar sein.



2.2.4.2. Allgemeine Regeln

1. Die Bemaßung soll die zweckentsprechendste Herstellung, Funktion und Prüfung gewährleisten.
2. Die eingetragenen Maße sind auf den Endzustand des dargestellten Gegenstandes zu beziehen.
3. Jede Abmessung darf nur einmal bemaßt sein (Ausnahme: Kegelverhältnis, Bild 2.46.).
4. Jedes Maß ist dort einzutragen, wo die Form der zu bemaßenden Stelle am deutlichsten zu erkennen ist.
5. Die Maße sind nach Möglichkeit an sichtbar dargestellten Kanten anzutragen (Volllinien). Ist das nicht möglich, so wird die Schnittdarstellung angewendet.
6. Blechdicken dürfen in die Darstellung eingeschrieben oder bei Platzmangel daneben geschrieben werden (Bild 2.38.).
7. Zur Einschränkung der ungeheuren Vielfalt möglicher Größen sind Vorzugsmaße anzuwenden.

2.2.4.3. Vorzugszahlen und Vorzugsmaße

Vorzugszahlen stellen eine bevorzugte Auswahl aus der grenzenlosen Menge von Zahlen dar.

Sie entsprechen folgenden Bedingungen:

1. Sie fügen sich in das dekadische System ein und schließen demzufolge ganzzahlige Zehnerpotenzen ein;
2. sie bilden ein einheitliches, logisch aufgebautes, mathematisch exaktes Zahlensystem;
3. sie lassen sinnvolle Größenstufungen zu und sind universell anwendbar;
4. es läßt sich mit ihnen einfach rechnen, weil durch Multiplizieren, Dividieren und Potenzieren von Vorzugszahlen wiederum Vorzugszahlen entstehen.

Das System der Vorzugszahlen besteht aus Zahlenfolgen, die als Vorzugsreihen bezeichnet werden. Diese sind dezimalgeometrisch gestuft, d. h., das Verhältnis (der Quotient) unmittelbar aufeinanderfolgender Glieder ist konstant.

Vier Grundreihen aus dem System der Vor-

zugszahlen sind standardisiert. Diese Reihen sind wie folgt gestuft:

Reihe	Quotient	Glieder in einem Zehnerbereich
R 5	$\sqrt[5]{10} \approx 1,60$	5
R 10	$\sqrt[10]{10} \approx 1,25$	10
R 20	$\sqrt[20]{10} \approx 1,12$	20
R 40	$\sqrt[40]{10} \approx 1,06$	40

Als Beispiel sei die Reihe R 10 angeführt: 1,00 1,25 1,60 2,00 2,50 3,15 4,00 5,00 6,30 8,00.

Von den standardisierten Vorzugszahlenreihen sind Rundwertreihen (Ra) abgeleitet und als Vorzugsmaße standardisiert worden. Die bei uns standardisierten Vorzugsmaße entsprechen der auf der Konferenz der Standardisierungsorgane der sozialistischen Länder im September 1959 vereinbarten Empfehlung R 90/59.

Die Vorteile der Anwendung von Vorzugszahlen und Vorzugsmaßen liegen hauptsächlich in folgendem:

1. Durch Verhinderung bzw. Einschränkung einer unnötigen Typenvielfalt und der damit verbundenen Erhöhung der Produktionsauflagen je Erzeugnisart wird der Arbeitsprozeß wirtschaftlicher;
2. die dezimalgeometrische Stufung gewährleistet, daß ein bestimmtes Bedarfsgebiet mit der allen Anforderungen entsprechenden geringsten Typenzahl gleichmäßig abgedeckt werden kann;
3. durch die nach geometrischen Gesetzmäßigkeiten ermittelten, voneinander abhängigen Größen werden die Anschlußmöglichkeit gesichert und der Austauschbau gefördert.
4. Werkzeuge und Lehren werden eingespart.

2.2.4.4. Bemaßung von kreis- und kurvenförmigen Konturen

Zur Bemaßung der vollen Kreisform wird immer das Durchmesserzeichen vor die

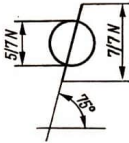


Bild 2.39. Durchmesserzeichen

Maßzahl gesetzt (Bild 2.39.). Verschiedene Möglichkeiten der Durchmesserbemaßung zeigt Bild 2.40.

Halbkreisformen und Teile davon werden bei der Bemaßung mit einem großen R vor der Maßzahl gekennzeichnet (Bild 2.41.).

Übersicht 2.42. nennt standardisierte Rundungshalbmesser.

Bei Kugelformen ist dem Durchmesser- oder Halbmesserzeichen das Wort „Kugel“ vorangestellt (Bild 2.43.).

Bogenmaße sind nach Bild 2.44. einzutragen. Die Maßhilfslinien laufen bei Bogen mit einem Zentriwinkel $\leq 90^\circ$ parallel zu den Winkelhalbierenden. Für Bogen mit einem Zentriwinkel $> 90^\circ$ laufen die Maßhilfslinien auf den Bogenmittelpunkt zu. Über die Maßzahl ist in diesem Falle ein Bogenstrich zu setzen. Bogenmaße sind für die Ermittlung gestreckter Längen und als Funktionsmaße wichtig.

2.2.4.5. Winkelbemaßung

1. Bei der Winkelbemaßung bildet die Maßlinie einen konzentrischen Kreis um den Scheitelpunkt des Winkels (Bild 2.45.).
2. Die Winkelangaben sind in Grad, bei größeren Genauigkeiten zusätzlich in Minuten vorzunehmen. Grad- und Minutenzeichen sind mit einzutragen.
3. Ist es nicht zu umgehen, Winkelangaben in den Sektoren bis zu 30° rechts oberhalb oder links unterhalb der Maßlinie einzutragen, sind ausnahmsweise die Maßzahlen von links lesbar zu schreiben.

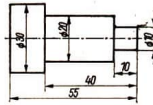


Bild 2.40. Durchmesserbemaßung

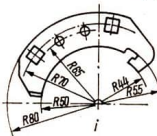
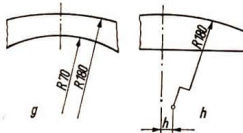
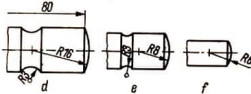
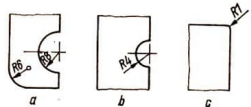


Bild 2.41. Halbmesserbemaßung



Vorzugsreihe	0,2 20	0,4 25	0,6 32	1 40	1,6 50	2,5 60	4 80	6 100	10 125	16 160	— 200
Nebenreihe (Zwischenwerte)	0,32 18	0,5 22	0,8 28	1,2 36	2 45	3 55	5 70	8 90	12 110	— 140	— 180

Übersicht 2.42.: Standardisierte Rundungshalbmesser

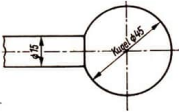


Bild 2.43. Kugelbemaßung

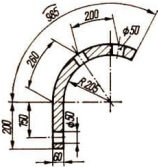


Bild 2.44. Bogenmaße

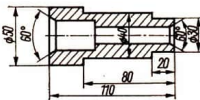
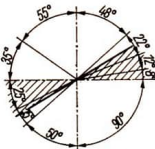


Bild 2.45. Winkelbemaßung, Leserichtung und Beispiel

2.2.4.6. Kegolverhältnis, Verjüngung, Neigung

Kegelverhältnis $\frac{D-d}{l}$. Eintragung dicht über der Mittellinie. Winkel $\frac{\alpha}{2}$ ist für Maschineneinstellung anzugeben. Dadurch erübrigt sich für die Bearbeitung z. B. das große Durchmessermaß. Da seine Angabe jedoch aus anderen Gründen zweckmäßig ist, wird es als Hilfsmaß in () gesetzt. Kegelverhältnisse, die bei Werkzeugen angewendet werden, sind standardisiert (Bild 2.46.).

Verjüngung $\frac{a_1 - a_2}{l}$. Bezieht sich auf das Verhältnis der Differenz der Seitenlängen zur Länge des vierseitigen Pyramidenstumpfs. Eintragung dicht über der Mittellinie wie beim Kegelverhältnis. Winkel $\frac{\alpha}{2}$ wird nicht angegeben. Das Quadratzichen (Seitenlänge $\triangleq 5/7$ der Maßzahlhöhe) steht immer vor der Maßzahl, um die quadratische Form zu kennzeichnen, wenn diese nicht aus der Ansicht, in der das Quadratmaß steht, ersichtlich ist. Nach Möglichkeit sollen aber beide Quadratseiten bemast sein, wodurch sich das Quadratzichen erübrigt.

Neigung $\frac{D-d}{2l}$. Eintragung dicht über der Mantellinie anstelle des Kegelverhältnisses bzw. der Verjüngung als Verhältniszahlen oder in Prozent. Die Angabe der Neigung ist oft vorteilhaft, um die Maschineneinstellung zu erleichtern oder wenn aus anderen Gründen diese Angabe benötigt wird (Bilder 2.47. und 2.48.).



2.2.4.7. Funktionsbedingte Bemaßung

Die Funktion erfordert es mitunter, auf die *Einhaltung der Symmetrie* besonders hinzuweisen (Bild 2.49.).

Für die Funktion ist oft die Einstellung bestimmter Maße, bezogen auf eine Fläche oder auf eine Linie (z. B. Mittellinie) des Gegenstandes, wichtig. In solchen Fällen wird von einer *Maßbezugsebene* oder *Maßbezugslinie* ausgegangen (Bild 2.51.).

Form- und Lageabweichungen sind, wenn es die Funktion erfordert, mit Hilfe von Symbolen und dahinter geschriebenen Maßabweichungen erläutert. Soll sich die Abweichung nicht auf die ganze Länge beziehen, so ist der entsprechende Längenbereich durch einen Schrägstrich von der Maßabweichung getrennt anzugeben (z. B. 0,02/20). Ist die Abweichung einer Fläche auf eine andere Fläche des betreffenden Gegenstandes bezogen, so ist die Bezugsbasis mit einem kleinen vollgeschwärzten gleichseitigen Dreieck zu kennzeichnen (Bild 2.56.).

Toleranz- und Passungsangaben sind durch die Funktion bedingte Eingrenzungen fertigungstechnischer Ungenauigkeiten.

In der Regel werden die Kurzzeichen des ISA-Toleranz- und -Passungssystems verwendet (Übersichten 2.50. und 2.53. und Bilder 2.54.a, b, c).

Die Qualität wird mit Zahlen und der Sitz mit Buchstaben bezeichnet. Die entsprechenden Abmaße sind Passungstabellen zu entnehmen.

Bohrungen (Innenmaße) werden mit *Großbuchstaben*, *Wellen (Außenmaße)* mit *Kleinbuchstaben* bezeichnet.

Die Kennzeichen sind hinter die Maßzahl zu setzen. Großbuchstaben stehen höher, Kleinbuchstaben und Zahlen stehen tiefer als die Maßzahl.

(Eintragungsbeispiele Bilder 2.54.a bis c)

Ist aus zwingenden Gründen die Angabe von Zahlenabmaßen notwendig, so wird entsprechend Bild und Übersicht 2.52. verfahren. Das Abmaß 0 wird nicht eingetragen.

Für Maße ohne Toleranzangabe gelten entweder die Freimaßtoleranzen nach

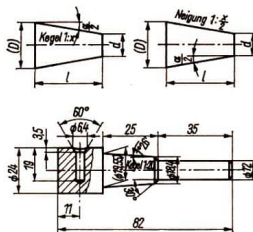


Bild 2.46. Kegolverhältnis

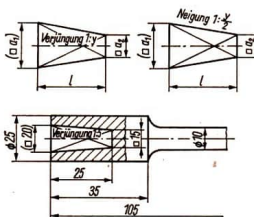


Bild 2.47. Verjüngung



Bild 2.48. Neigung in Prozent

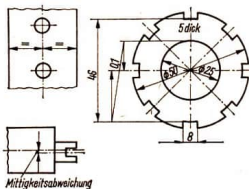


Bild 2.49. Hinweise zur Einhaltung der Symmetrie



ISA-Qualität		Lage des Außenmaßes										
Innenmaß	Außenmaß	b	d	e	f	g	h	k	n	r	s	u
7	6					$\frac{H7}{g6}$ *	$\frac{H7}{h6}$ *	$\frac{H7}{k6}$ **	$\frac{H7}{n6}$ **	$\frac{H7}{r6}$ ***		
7	7				$\frac{H7}{f7}$ *						$\frac{H7}{s7}$ ***	
7	8			$\frac{H7}{e8}$ *								$\frac{H8}{u8}$ ***
8	7						$\frac{H8}{h7}$ *					
8	8						$\frac{H8}{h8}$ *					
8	9		$\frac{H8}{d9}$ *		$\frac{H8}{f9}$ *		$\frac{H8}{h9}$ *					
11	11		$\frac{H11}{d11}$ *				$\frac{H11}{h11}$ *					
12	12	$\frac{H12}{b12}$ *					$\frac{H12}{h12}$ *					

Übersicht 2.50.: Vorzugsreihe der Paßtoleranzen im System Einheitsbohrung
 *Spielpassungen **Übergangspassungen ***Preßpassungen

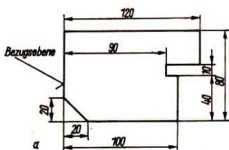


Bild 2.51. Bezugsebene und Bezugslinie

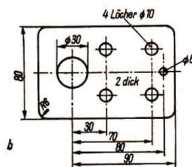
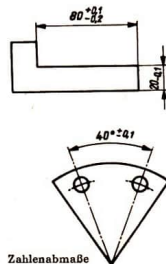


Bild 2.52. Zahlenabmaße





Maßangabe	Nennmaß	Größtmaß	Kleinstmaß	Toleranz
80 $+0,1$ $-0,2$	80	80,1	79,8	0,3
20 $-0,1$	20	20	19,9	0,1
40° $\pm 1^\circ$	40°	41°	39°	2°

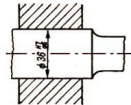
Übersicht zu Bild 2.52.

ISA-Qualität		Lage des Innenmaßes				
Innenmaß	Außenmaß	D	F	H	K	N
7	6			H7 h6 *	K7 h6 **	N7 h6 **
8	6		F8 h6 *			
8	7			H8 h7 *		
8	8			H8 h8 *		
9	8		F9 h8 *			
8	9		F8 h9 *	H8 h9 *		
11	11	D11 h11 *		H11 h11 *		
12	12			H12 h12 *		

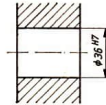
Übersicht 2.53.: Vorzugsreihe der Paßtoleranzen im System Einheitswelle
 *Spielpassungen **Übergangspassungen



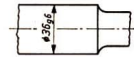
Bild 2.54.a
Beispiel für eine Spielpassung



Eintragung
in der Zusammen-
bau-
zeichnung



Eintragung
für die
Bohrung



Eintragung
für die
Welle

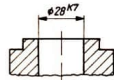
Bild 2.54.b
Beispiel für eine Übergangspassung



Eintragung
in der Zusammen-
bau-
zeichnung



Eintragung
für das
Außenmaß



Eintragung
für das
Innenmaß

Bild 2.54.c
Beispiel für eine Preßpassung



Eintragung
in der Zusammen-
bau-
zeichnung



Eintragung
für das
Außenmaß



Eintragung
für das
Innenmaß

Bild 2.55. Prüfmaß

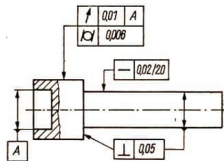


Bild 2.56. Symbole für Form- und Lageabweichungen,
nach [4]

Art der Abweichung	Symbol	Lageabweichung, von der Parallelität	//
Formabweichung, von der Geraden	—	—, von der Koaxialität	⌋
—, vom Kreis	○	—, von der Normalität	⊥
—, von der Ebene	□	—, von der Kreuzung	⊗
—, vom Zylinder	⊗	—, von der Symmetrie	⊕
Stirnlauf- u. Rundlaufabweichung	↗	—, vom rechten Winkel	⊥



TGL 2897 oder betriebsübliche Abweichungen oder eine im Schriftfeld der Zeichnung besonders vermerkte Abweichung.

Besonders zu *prüfende Maße* werden eingrahmt (Bild 2.55.).

Teilungen. Gleiche Teilungen dürfen vereinfacht bemäßt werden (Bild 2.59.).

Muß von einer Maßbezugslinie ausgegangen werden, so addiert man die Maße von dort ausgehend fortlaufend (Bild 2.58.).

Bei notwendigen Toleranzangaben ist die vereinfachte Bemaßung zulässig (Bild 2.57.).

2.2.4.8. Vereinfachte Bemaßung von Löchern

Im Sinne einer rationellen Anfertigung von Zeichnungen sollen Löcher nach TGL 31045 so vereinfacht dargestellt und bemäßt werden, daß sie noch eindeutig erkennbar sind. Der Grad der Vereinfachung richtet sich nach dem Verwendungszweck und dem Maßstab der Zeichnung.

Die Lage von Löchern ist durch Schnittpunkte von Mittellinien oder durch Achslinien anzugeben. Das Bemaßen erfolgt mit Hilfe von Bezugslinien entsprechend der Übersicht 2.60.

2.2.5. Oberflächenkennzeichnung und Bearbeitungsangaben

Wenn die Funktion der Teile in der Maschine besondere Forderungen an die Oberflächen stellt, ist das in der Zeichnung durch Angabe der Oberflächenrauheit, gegebenenfalls in Verbindung mit Wortangaben zum Ausdruck zu bringen. Die Kennzeichnung muß sich auf den Endzustand der Oberfläche beziehen. Die Angabe der Oberflächenrauheit in Zeichnungen ist nach TGL 31050 standardisiert.

Oberflächenrauheit. Im allgemeinen wird die mittlere Rauheit R_z in μm angegeben. Darunter ist der mittlere Abstand zwischen den 5 höchsten und den 5 tiefsten Punkten

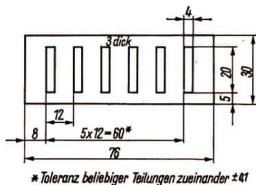


Bild 2.57. Teilungen mit Toleranzangabe

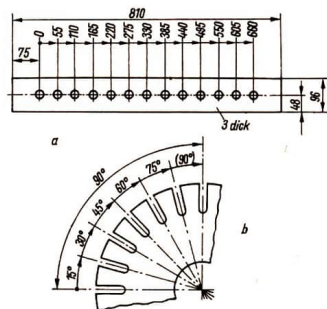


Bild 2.58. Bemaßung von Teilungen von einer Bezugslinie aus

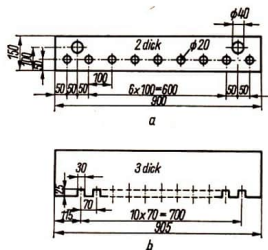


Bild 2.59. Vereinfachte Bemaßung für Teilungen



des Istprofils einer Bezugsstrecke zu ver-
stehen:

$$R_z = \frac{(y_2 + y_4 + y_6 + y_{10}) - (y_1 + y_3 + y_5 + y_7 + y_9)}{5}$$

Die Rauheitsmaße der mittleren Rauheit

(in μm) innerhalb der Rauheitsbezugsstrek-
ken 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 (in mm) sind in
Übersicht 2.61.a zusammengestellt.

Die Prüfung der Oberflächenrauheit erfolgt
durch Vergleich mit Oberflächenvergleichs-
stücken oder auf optischem Wege.

Bemaßen nach TGL 31045	Beispiele
Bezugslinien (schmale Volllinien) gehen vom Schnittpunkt der Mittellinien oder dem Schnittpunkt der Achs- mit der Konturlinie aus.	
Durchgehende runde Löcher sind durch das Zeichen \varnothing bzw. das Gewindekurzzeichen und den zugehörigen Zahlenwert auf dem waagerechten Teil der Bezugslinie zu bemaßen. Bei Löchern für Kegelstifte wird die Maßangabe durch das Zeichen \triangleleft und das Kegelverhältnis ergänzt.	
Bei nicht durchgehenden Löchern sind zusätzlich die zylindrische Lochtiefe bzw. die nutzbare Gewindelänge anzugeben.	
In Ansichten sind sichtbare und verdeckte Löcher durch ausführliche Darstellung deutlich zu unterscheiden. In geschnittenen Darstellungen ist die Lage der Löcher zu beachten; Mittellinien sind nicht durchgehend zu zeichnen.	
Zulässige Abweichungen sind hinter das Maß zu schreiben	
Angaben für Senkungen werden, getrennt durch einen Bindestrich, hinter den Angaben für die Löcher eingetragen. Keglige Senkungen sind mit Durchmesser und Kegelwinkel, zylindrische Senkungen mit Durchmesser und Tiefe zu kennzeichnen.	

Übersicht 2.60.: Vereinfachtes Bemaßen von Löchern und Senkungen (Auswahl)



R_z	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	10	20	40	80	160	320
-------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	----	----	-----	-----

Übersicht 2.61.a: Mittlere Rauheit

Angabe der Oberflächenrauheit. Bei der Angabe der Oberflächenrauheit in Zeichnungen sind nach TGL 31050 *Symbole* anzuwenden, wie sie in Übersicht 2.61.b dargestellt werden.¹ Form und Größe dieser Symbole sind nach Bild 2.62. mit mittelbreiten Volllinien auszuführen. Entsprechend konkreter funktioneller oder technischer Anforderungen können am Symbol ergänzende Angaben eingetragen werden (Bild 2.63.a). Danach wird die *Rauheitskenngröße* als Kurzzeichen R_z mit Zahlenwert in μm angegeben (Bild 2.63.b). Der *Verlauf der Bearbeitungsspuren* hängt vom angewandten trennenden Fertigungsverfahren ab und wird durch Kurzzeichen nach Übersicht 2.63.c gekennzeichnet. Der Zahlenwert der *Rauheitsbezugsstrecke* ist in mm anzugeben (Bild 2.63.d), und für die Angabe eines bestimmten *Fertigungsverfahrens* wird eine entsprechende Wortangabe eingetragen (Bild 2.63.e).

Bei Angabe der Oberflächenrauheit in der Zeichnung wird das Symbol auf der zu kennzeichnenden Oberfläche, einer Maßhilfslinie oder Bezugslinie (von unten oder von rechts lesbar) eingetragen.

Eintragungsbeispiele. Bei symmetrischen Teilen mit beiderseitig gleicher Oberflächenrauheit sind die Symbole nur an einer Seite einzutragen (Bild 2.64.a). Bei rotationssymmetrischen Teilen sind die Symbole an der Mantellinie oder bei Platzmangel an der Maßhilfslinie einzutragen (Bild 2.64.b). Teile, deren Oberflächenrauheit an der Kontur gleich ist, werden durch ein Ringsumzeichen gekennzeichnet (Bild 2.64.c). Bei Teilen mit allseitig gleicher

Oberflächenrauheit ist unmittelbar über dem Schriftfeld das gemeinsame Symbol einzutragen (Bild 2.64.d). Für Teile mit der überwiegenden Anzahl von Flächen gleicher Oberflächenrauheit ist ebenfalls über dem Schriftfeld das gemeinsame Symbol anzugeben. Davon abweichende Flächen sind in der Darstellung einzeln zu kennzeichnen. Als Hinweis auf diese Flächen ist hinter dem gemeinsamen Symbol in Klammern das Grundsymbolsymbol ohne Angabe der Oberflächenrauheit einzutragen (Bild 2.64.e).

Symbol	Erklärung
	Fertigungsverfahren freigestellt
	Fertigungsverfahren Trennen
	Fertigungsverfahren außer Trennen

Übersicht 2.61.b: Symbole zur Angabe der Oberflächenrauheit

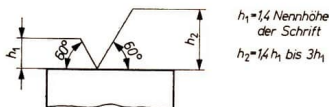


Bild 2.62. Ausführung des Grundsymbols

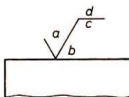


Bild 2.63.a Eintragung von Angaben am Symbol

(a = Rauheitskenngröße mit Zahlenwert; b = Bearbeitungsspuren; c = Rauheitsbezugsstrecke; d = Fertigungsverfahren)

¹ Da vorhandene Zeichnungen nicht umgestellt werden, sind nur in den Abbildungen des Abschnitts 2.2.5. Angaben der Oberflächenrauheit nach TGL 31050 enthalten. In den anderen Zeichnungen des Titels werden Oberflächenzeichen nach TGL 0-140 Bl. 2 verwendet (z. B. Bild 2.2., S. 14).

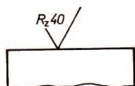


Bild 2.63.b Rauheitskenngröße mit Zahlenwert (Beispiel)

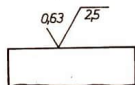


Bild 2.63.d Rauheitsbezugsstrecke (Beispiel)

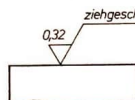


Bild 2.63.e Fertigungsverfahren (Beispiel)

Kurzzeichen	Verlauf der Bearbeitungsspuren zur gekennzeichneten Fläche	Eintragung
=	parallel	✓ =
⊥	senkrecht	✓ ⊥
X	gekreuzt	✓ X
M	in mehreren Richtungen	✓ M
C	ungefähr kreisförmig	✓ C
R	radial	✓ R

Bild 2.63.c Verlauf von Bearbeitungsspuren

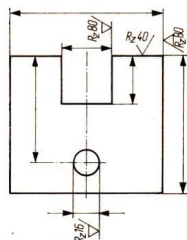


Bild 2.64.a Symboleintragung für symmetrische Teile

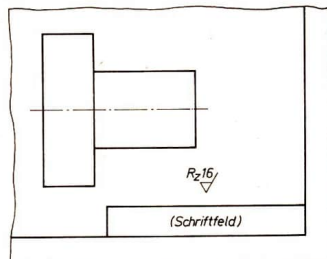


Bild 2.64.d Gemeinsames Symbol

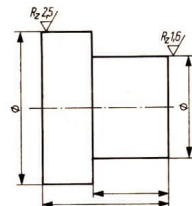


Bild 2.64.b Symbol-eintragung für rotationssymmetrische Teile

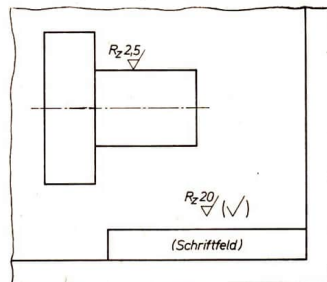


Bild 2.64.e Gemeinsames Symbol und Grundsymbol

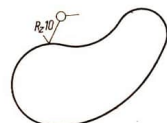


Bild 2.64.c Ringsumzeichen



2.2.6. Werkstoffangaben

Die Werkstoffkennzeichnung in der technischen Zeichnung unterscheidet

Stoffangaben und
Formangaben.

Stoff- und Formangaben setzen sich aus den in DDR-Standards festgelegten Kurzbezeichnungen zusammen.

2.2.6.1. Stoffangaben

Elemente der Kurzbezeichnungen für Stahlmarken:

Angaben über die Stahlart bzw. die Herstellung

St \triangle Stahl
E \triangle Elektrostahl
M \triangle Siemens-Martin-Stahl
T \triangle Thomasstahl, unberuhigt
W \triangle nach Sonderverfahren hergestellter Stahl
(wenn W am Anfang steht)
u \triangle unberuhigt
hb \triangle halbberuhigt
b \triangle beruhigt
W \triangle Werkzeugstahl

Angaben über die Nachbehandlung

U \triangle walzhart, schmiedehart (unbehandelt)
G \triangle weichgeglüht
N \triangle normalgeglüht
Q \triangle abkantbar
KG \triangle gezogen und weichgeglüht
V \triangle vergütet
VÖ \triangle Ölvergütet
VL \triangle luftvergütet
AS \triangle abgeschreckt
H + A \triangle gehärtet und angelassen

Angaben über Legierungsbestandteile

Al \triangle Aluminium C \triangle Kohlenstoff Si \triangle Silizium
Cr \triangle Chrom P \triangle Phosphor Ti \triangle Titan
Mn \triangle Mangan S \triangle Schwefel V \triangle Vanadin
Mo \triangle Molybdän Ni \triangle Nickel W \triangle Wolfram

Elemente der Kurzbezeichnungen für Nichteisenmetalle:

<i>Rein- und Reinstmetalle</i>	<i>Aluminium-Knetlegierungen</i>
Al \triangle Aluminium	Al Mg
Mg \triangle Magnesium	Al Mg Si
Cu \triangle Kupfer	Al Cu Mg
Si \triangle Silizium	Al Zn Mg Cu
Zn \triangle Zink	<i>Magnesium-Knetlegierungen</i>
Sa \triangle Zinn	Mg Al Zn

Elemente der Kurzbezeichnungen für Eisen-Gußwerkstoffe:

G \triangle Guß (allgemein)
GGL \triangle Grauguß
GGG \triangle Gußeisen mit Kugelgraphit
GS \triangle Stahlguß
GTW \triangle Temperguß, weißer Bruch
GTS \triangle Temperguß, schwarzer Bruch

Bezeichnungsbeispiele für Eisengußwerkstoffe¹

GG - 18 \triangle Grauguß,
Mindestzugfestigkeit 18 $\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$

GGG - 70 \triangle Gußeisen mit Kugelgraphit,
Mindestzugfestigkeit 70 $\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$

GS - C 25 \triangle Warmfester Stahlguß mit 0,25 % Kohlenstoffgehalt

GTW - 35 \triangle Weißer Temperguß,
Mindestzugfestigkeit 35 $\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$

Nichteisenmetall-Gußlegierungen haben am Anfang der Kurzbezeichnung den Zusatz

G \triangle Guß (allgemein)
GK \triangle Kokillenguß
GD \triangle Druckguß

¹ 1 kp mm⁻² = 9,80665 MPa

2.2.6.2. Bezeichnung von Werkstoffquerschnitten

Die graphischen Kurzbezeichnungen für Querschnitte und die Reihenfolge der Maßeintragung für Werkstoffe mit konstantem Querschnitt sind in Übersicht 2.65. dargestellt.

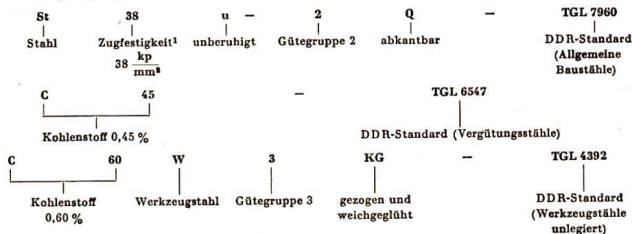
2.2.6.3. Schraffuren zur Kennzeichnung von Werkstoffen

Von der üblichen Schraffur mit schmalen Volllinien möglichst unter 45° zur Achse oder zu den Hauptumrissen wird nur in besonderen Fällen abgewichen; so z. B., wenn außer metallischen Werkstoffen andere Werkstoffe für den dargestellten Gegenstand zu verwenden sind.

Zur Unterscheidung der verschiedenen

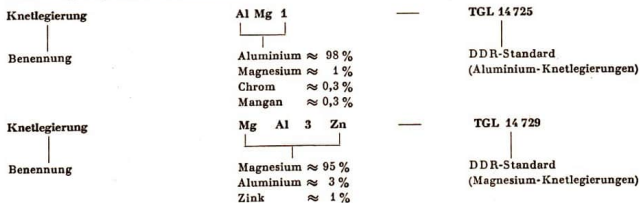


Bezeichnungsbeispiele für Stähle



¹ 1 kpmm⁻² = 9,80665 MPa

Bezeichnungsbeispiele für Nichteisenmetalle



Werkstoffe können dann bei Schnittdarstellungen die nachstehend angedeuteten Schraffuren angewandt werden (Übersicht 2.66.). Der Abstand der Schraffurlinien wird der Größe der Schnittfläche angepaßt. Die genaue Werkstoffbezeichnung erübrigt sich durch die Anwendung der besonderen Schraffuren nicht.

2.2.7. Maschinenelemente

2.2.7.1. Gewindedarstellung

Das Gewindeprofil wird sinnbildlich durch breite und schmale Vollenlinien dargestellt. Bei Blickrichtung längs der Gewindeachse ist der Kerndurchmesser symboli-























sierende Kreis über etwa $\frac{1}{4}$ des Umfangs offenzulassen.

Bei den metrischen ISO-Gewinden wird im Hinblick auf die Flankendurchmessertoleranz zwischen „f“ (fein), „m“ (mittel), „g“ (grob) unterschieden. Die Kurzzeichen „f“ oder „g“ sind der Gewidekurzbezeichnung hinzuzufügen (z. B. M 12 f). Bei Gewinden mit der Flankendurchmessertoleranz „m“ braucht das nicht zu geschehen.

Für die anzuwendenden Gewindenenn-durchmesser sind Vorzugsgrößen standardisiert. Auf der Zeichnung entsteht der Kerndurchmesser: $0,8 \times \text{Nenn-durchmesser}$ (Übersicht 2.70.).

Abmessungen und Formen für Gewindeausläufe (Übergänge zum gewindelosen



Art des Querschnittes	grafisch	Kurzbezeichnung	Maße	Eintragung der Maße
Rund		d		
Rund - Rohr		$d \times s$		
Quadrat		a		
Rechteck		$a \times b$		
Sechskant		a		
Dreikant		a		
Halbrund		$a \times s$		
Volles Band Streifen		$a \times s$		
gleichschenkliger Winkel		$a \times s$		
I-Form		Nr oder andere Angaben		
Doppel-I-Form		Nr oder andere Angaben		
U-Form, symmetrisch		Nr oder $h \times a \times s$		

Übersicht 2.65.: Kurzbezeichnung und Maßeintragung für Werkstoffquerschnitte nach TGL RGW 209-75 (Auszug)

Werkstückteil) und Gewinderillen sind in Standards festgelegt.

2.2.7.2. Schrauben

Es können nach der Funktion unterschieden werden: Befestigungsschrauben, Bewegungsschrauben, Druckschrauben, Spannschrauben, Verschlussschrauben und Schraubstopfen. Schrauben und Muttern können vollständig, vereinfacht oder sinnbildlich dargestellt werden (Bild 2.71.). Bei der vollständigen Darstellung können die Kurven (Parabeln) mit Schablonen gezeichnet werden.

Liegen Schrauben in der Schnittebene, so sind sie ungeschnitten zu zeichnen. Wenn

die Anschaulichkeit dadurch steigt, können die Muttern ebenfalls ungeschnitten dargestellt werden (Bild 2.71.).

2.2.7.3. Niete

Niete dienen zur Herstellung sogenannter nichtlösbarer Verbindungen (Verbindung ist nur durch Zerstörung des Verbindungselementes lösbar, Übersicht 2.76.).

Nietverbindungen. Arten der Nietverbindungen unterscheidet man

nach ihrer Funktion:

feste Nietung (z. B. im Stahlbau)

dichte Nietung (z. B. im Behälterbau)

feste und dichte Nietung (z. B. im Kesselbau, Druckbehälterbau)



Werkstoff	Art der Schraffur	Werkstoff	Art der Schraffur
Metallische Werkstoffe		Marmor, Schiefer, Porzellan	
Nicht-metallische Werkstoffe		Ziegel-mauerwerk	
Elektrische Wicklungen		Unbewehrter Beton	
Durchsichtige und durchscheinende Werkstoffe		Bewehrter Beton, Stahlbeton	
Optisches Glas		Schamotte und feuerfeste Steine	
Holz (Hirnholz, Längsholz)		Erdreich	
Gesinterte Werkstoffe		Flüssigkeiten	

Übersicht 2.66.: Schraffuren zur Kennzeichnung von Werkstoffen nach TGL 9727, Blatt 4

nach ihrer Ausführung:
Überlappungsnietzung (einreihige, mehrreihige)
Laschennietung (einfache, doppelte).

2.2.7.4. Stifte

Stifte dienen der Lagesicherung beim Zusammenbau von Teilen und der Herstellung lösbarer Verbindungen (Bild 2.77. und Übersicht 2.79.).

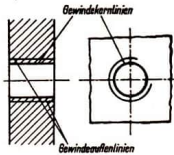


Bild 2.67.a Gewindedarstellung, Innengewinde

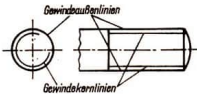


Bild 2.67.b Gewindedarstellung, Außengewinde

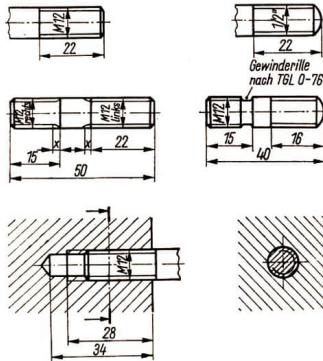


Bild 2.68. Gewindebemaßung

2.2.7.5. Vereinfachte Darstellung von Verbindungselementen

Nach TGL 31091 sollen lösbare Verbindungen so vereinfacht dargestellt werden, daß sie noch eindeutig erkennbar sind (Bild 2.71.). Davon ausgehend sind Verbindungselemente vereinfacht oder sinnbildlich darzustellen (Übersicht 2.75). Beim sinnbildlichen Darstellen von Elementen entsprechen die Abmessungen des Sinnbildes den

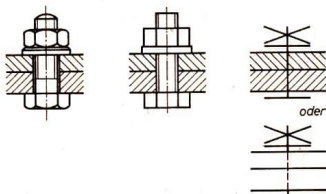


Gewindeart	Kurzzeichen	Bestandteile der Gewindekurzbezeichnung	Beispiele
Metrisches ISO-Grobgewinde	M	Gewindenennendurchmesser (in mm)	M 12
Metrisches Gewinde (alt)		Gewindenennendurchmesser	M 80×6
Metrisches ISO-Feingewinde		mal Steigung (in mm)	M 80×6
Metrisches Feingewinde (alt)			
Whitworth-Gewinde	—	Gewindenennendurchmesser (in Zoll)	2"
Whitworth-Feingewinde	W	Gewindenennendurchmesser (in mm) mal Steigung (in Zoll)	W 99×1/4"
Whitworth-Rohrgewinde	R	Gewindegröße = Nennweite des Rohres (in Zoll)	R 3/4"
Trapezgewinde	Tr	Gewindenennendurchmesser (in mm) mal Steigung (in mm)	Tr 48×8
Rundgewinde	Rd	Gewindenennendurchmesser (in mm) mal Steigung (in Zoll)	Rd 40×1/8"
Sägewinde	S	Gewindenennendurchmesser (in mm) mal Steigung (in mm)	S 70×10
Elektrogewinde	E	Gewindenennendurchmesser (in mm)	E 27
Stahlpanzerrohrgewinde	Pg	Gewindegröße = Nenngröße des Stahlpanzerrohrs (in mm)	Pg 21
Ventilgewinde	Vg	Gewindenennendurchmesser (in mm)	Vg 12







Übersicht 2.69.: Gewindekurzbezeichnungen

Gewindenennendurchmesser	Gewindesteigung	Bolzenkerndurchmesser	Mutterinnendurchmesser
1	0,25	0,693	0,729
1,2	0,25	0,893	0,929
1,6	0,35	1,171	1,221
2	0,4	1,509	1,567
2,5	0,45	1,948	2,013
3	0,5	2,387	2,459
4	0,7	3,141	3,242
5	0,8	4,019	4,134
6	1	4,773	4,917
8	1,25	6,466	6,647
10	1,5	8,160	8,376
12	1,75	9,853	10,106
16	2	13,546	13,835
20	2,5	16,933	17,294
24	3	20,319	20,752
30	3,5	25,706	26,211
36	4	31,093	31,670

Übersicht 2.70.: Vorzugsgrößen standardisierter Schrauben- und Mutterngewinde



ausführlich vereinfacht sinnbildlich
Bild 2.71. Darstellung einer Schraubverbindung mit Sechskantschraube, Scheibe und Mutter

Form	Benennung und Bezeichnungsbeispiele
	Zylinderschraube mit Querschlitze A M 5×20 TGL 0-84
	Linsenkopfschraube mit Kreuzschlitze M 6×20 TGL 0-7985
	Senkkopfschraube mit Nase M 10×70 TGL 0-604
	Linsensenkkopfschraube mit Querschlitze BM 5×40 TGL 5687
	Sechskantkopfschraube M 10×70 TGL 0-601
	Stiftschraube BM 16×80 TGL 0-939 — 89

Übersicht 2.72.: Schraubenarten und -bezeichnungen

größten Abmessungen des jeweiligen Elements (z. B.: Länge des Querstriches entspricht dem Eckmaß des Sechskantkopfes).

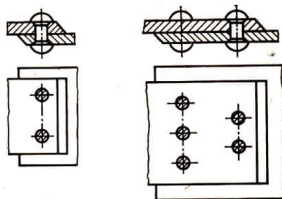


Bild 2.73. Überlappungsnielung

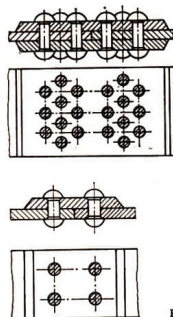
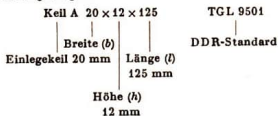


Bild 2.74. Laschenniелung

2.2.7.6. Keile und Paßfedern

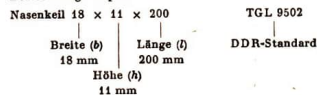
Einlegekeile und Treibkeile (Bild 2.78.)

Bezeichnungsbeispiel:




















Nasenkeile (Bild 2.81.)

Bezeichnungsbeispiel:











Verbindeelement	vereinfacht	Darstellung sinnbildlich
Sechskantkopf- schraube		
Linsenkopf- schraube mit Kreuzschlitz		
Zylinderkopf- schraube mit Querschlitz		
Linsensenkopf- schraube mit Querschlitz		
Zylinderstift		
Kegelstift		
Kerbstift, zylindrisch		
Sechskantmutter		
Rändelmutter		
Scheibe		
Federring		

Übersicht 2.75.: Darstellung von Verbindungselementen nach TGL 31091 (Auszug)



Form	Benennung	Bezeichnungsbeispiel
	Halbrundniet Schaftdurchmesser 1 bis 9 mm	Niet 6×20 TGL 0-660 M St 2 u blank
	Flachniet Schaftdurchmesser 3 bis 8 mm	Niet B 6×20 TGL 7338 M St 2 u
	Senkniet Schaftdurchmesser 1 bis 9 mm	Niet 7×30 TGL 0-661 M St 2 u blank
 Form B	Linsenniet Schaftdurchmesser 1,7 bis 8 mm	Niet 4×10 TGL 0-662 M St 2 u blank
	Riemenniet Schaftdurchmesser 3 bis 5 mm	Niet 5×20 TGL 0-675 Cu
	Hohlriet Schaftdurchmesser 1,5 bis 6 mm	Niet 3×0,25×6 TGL 0-7339 M St 4 u

Übersicht 2.76.: Nietkopfformen und -bezeichnungen (Auswahl)

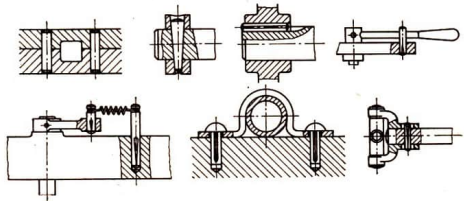


Bild 2.77. Stiftverbindungen

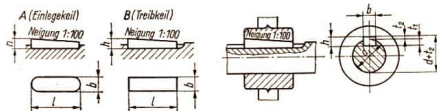





Bild 2.78. Einlege- und Treibkeile (TGL 9501)



Stiftform	Benennung	Bezeichnungsbeispiel
 Durchmesser toleranz m6	Zylinderstift \varnothing 0,8 bis 25 mm	Zylinderstift 4×9×20 TGL 0-7
	Kegelstift \varnothing 25 bis 20 mm	Kegelstift 3×10 TGL 0-1
	Paßkerbstift \varnothing 1,5 bis 16 mm	Paßkerbstift 5×16 TGL 0-1472

Übersicht 2.79.: Stiftformen und -bezeichnungen

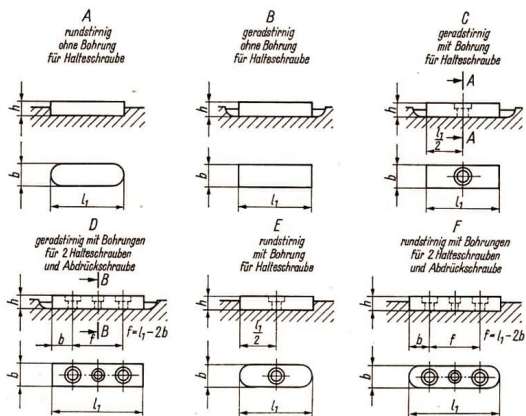


Bild 2.80. Paßfedern

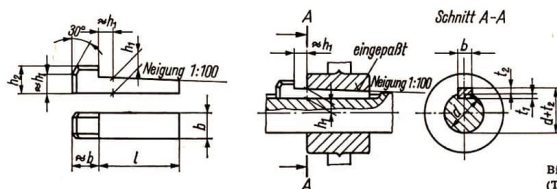


Bild 2.81. Nasenkeile (TGL 9502)

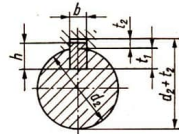
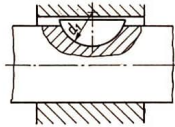
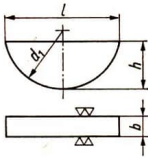


Bild 2.82.
Scheibenfedern

Paßfedern (Bild 2.80.)

Bezeichnungsbeispiel:

Paßfeder A	12 × 8 × 56	TGL 9500
rundstirnig	Höhe (h)	DDR-Standard
ohne Halteschraube	8 mm	
Breite (b)	Länge (l)	
12 mm	56 mm	

Scheibenfedern (Bild 2.82.)

Bezeichnungsbeispiel:

Scheibenfeder	4 × 5	TGL 9499
	Breite (b)	DDR-Standard
	4 mm	
	Höhe (h)	
	5 mm	

2.2.7.7. Zug- und Druckfedern

Zug- und Druckfedern dienen der elastischen Verbindung bei gleichzeitiger Ausnutzung der Federkraft.

Zugfedern: Windungen liegen im Ruhezustand aneinander und werden bei Kraftwirkung auseinandergezogen.

Druckfedern: Windungen haben im Ruhezustand Zwischenraum und werden bei Kraftwirkung zusammengedrückt.

Zug- und Druckfedern sollen in technischen Zeichnungen vereinfacht dargestellt werden,

Benennung	Ansicht	Darstellung Schnitt	Sinnbild
Druckfeder			
Zugfeder			
Kegelfeder			
Tellerfeder			
Spiralfeder		—	
Blattfeder		—	

Übersicht 2.83.: Zug- und Druckfedern (Auswahl)

Bezeichnungsbeispiel für eine Druckfeder:

Druckfeder	6,3 × 45 × 11,5	A	TGL 9279
Benennung	Draht- Außendurchmesser	Klasse des Federstahls	
	(d) (da)		
	Gesamtwindungszahl	DDR-Standard	
	(ig)		

Zusätzliche Angaben auf der Zeichnung:

- Zahl der federnden Windungen (if)
- Windungsrichtung (rechts, links)
- Ausbildung der Federenden (z. B. Ösen, senkrecht geschliffen)
- Drahtlänge
- Drahtoberfläche (z. B. gezogen, verkadmet)
- Arbeitshub (h)
- Darstellung des entsprechenden Federdiagramms (F_0 ; f_0 , ..., F_n ; f_n)



d. h. nicht alle Windungen sind zu zeichnen. In Gesamtzeichnungen, Schemata und dergleichen ist die sinnbildliche Darstellung zu bevorzugen (Übersicht 2.83.).

2.2.7.8. Schweißverbindungen

Das Schweißen führt zu nicht lösbaren Verbindungen. Zu unterscheiden sind zwei Gruppen von Schweißverfahren:

Preßschweißen und

Schmelzschweißen.

Von den Preßschweißverfahren hat vor allem das

elektrische Widerstandsschweißen,
und zwar in seiner Ausführung als

Punkt- oder Nahtschweißen Bedeutung.

Die wichtigsten Verfahren des Schmelzschweißens sind:

Verfahren	Kurzzeichen
Gasschweißen	G
Lichtbogenschweißen	E
Unterpulverschweißen	UP
Unterschienenschweißen	US
Schutzgas-Lichtbogenschweißen	SG

Für die Arten der Schweißnähte und für deren verschiedene Ausführungsformen sind Sinnbilder (Schweißzeichen) festgelegt (Bilder 2.84., 2.85. und 2.86. sowie die Bilder 2.87. und 2.88.).

2.2.7.8. Zahnradgetriebe

Zahnräder dienen der Übertragung und Richtungsänderung von Drehbewegungen und Kraftwirkungen. Durch unterschied-

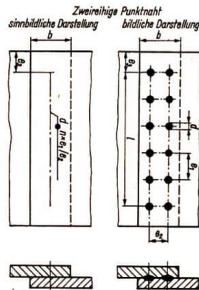


Bild 2.85. Schweißzeichnung (Preßschweißung), nach [4]

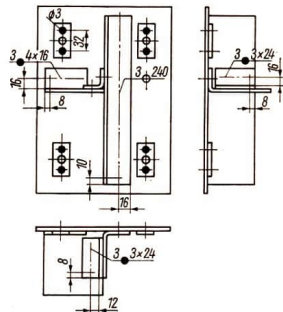


Bild 2.86. Schweißzeichnung (Schmelzschweißung) nach [4]



Bild 2.84. Schweißzeichen (Zusatzzeichen), nach [4]



Naht	Benennung	Symbol	Ansicht (sinnbildlich)	Schnitt (bildlich)
Überlappnaht	Punktnaht	●		
		(*) (nach ISO-Vorschlag)		
	Rollennaht	Φ		
	Buckelnaht	X		
Stumpfnah	Quetschnaht	◐		
	Gratnaht	⊥		
	Wulstnaht	I		

Bild 2.87. Symbole für Preßschweißen, nach [4]

Die Symbole sind bevorzugt in der Ansicht zu verwenden; für die Schnitte sollten die bildlichen Darstellungen Anwendung finden.

Stumpfnähte werden in der Ansicht durch eine Vollinie, Überlappnähte durch eine Vollinie und eine Strichlinie (verdeckte Kante) charakterisiert



<i>Naht</i>	<i>Benennung</i>	<i>Symbol</i>	<i>Ansicht (sinnbildlich)</i>	<i>Schnitt (bildlich)</i>
<i>Stumpfnaht</i>	<i>Allgemein</i>	S		
	<i>I-Naht</i>	II		
	<i>V-Naht</i>	V		
	<i>X-Naht</i>	X		
	<i>Y-Naht</i>	Y		
<i>Kehlnaht</i>	<i>Kehlnaht</i>			
	<i>Doppel- kehlnaht</i>			
	<i>Ecknaht</i>			
<i>Stirrnaht</i>	<i>Stirnflachnaht</i>	III		
	<i>Stirnfugennaht</i>	M		

Bild 2.88. Symbole für Schmelzschweißen, nach [4]

Wird keine besondere Naht gefordert, so wird nur das Symbol S in der Zeichnung vermerkt.

Weitere Angaben über Schweißverfahren (siehe auch Seite 50); Güte der Schweißnaht und ihre Prüfung, Nachbehandlung der Schweißnaht und Schweißrichtung können neben dem jeweiligen Symbol als Text angegeben werden



liche Zähnezahlen werden auch Drehzahländerungen erreicht. Um Zeichenarbeit einzusparen, wird die Zahnform nicht dargestellt. Sollte das in Sonderfällen notwendig sein, so ist sie als Einzelheit herauszuzeichnen.

Zur Vereinfachung werden die Zähne durch Kopfkreis (breite Vollinie) und/oder Teilkreis (schmale Strichpunktlinie) dargestellt (Bild 2.89.).

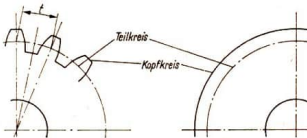


Bild 2.89. Grundgrößen am Zahnrad

Kopfkreis: Umfangslinie über Zahnköpfe verlaufend.

Teilkreis: gedachte Linie zwischen Zahnfuß und Zahnkopf, auf der die Teilung t (Abstand von Zahn zu Zahn) gemessen wird.

Die Teilung am Zahnrad ist immer ein Vielfaches von π . Der Vervielfachungsfaktor heißt Modul m (in mm). Es gilt also:

$$t = m \cdot \pi \text{ (in mm).}$$

Zähnezahl und Modul müssen als erläuternde Angaben zur zeichnerischen Darstellung vermerkt sein.

Grundformen der Zahnräder:

Stirnräder (Bild 2.92.)

Schraubenräder (Bild 2.93.)

Schnecken und Schneckenräder (Bild 2.94.)

Kegelräder (Bild 2.95.)

Verzahnungen:

Geradverzahnung

Schrägverzahnung

Pfeilverzahnung

Bogenverzahnung

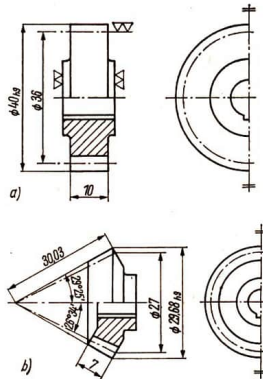


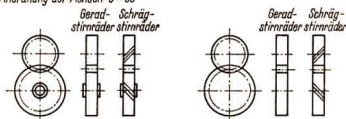
Bild 2.90. Bemaßung von Zahnrädern: a) Stirnrad; b) Kegelrad, nach [4]

Modul	Teilung	Modul	Teilung	Modul	Teilung	Modul	Teilung	Modul	Teilung
0,3	0,942	1,25	3,927	3,25	10,210	6,5	20,420	14	43,982
0,4	1,257	1,5	4,712	3,5	10,996	7	21,991	15	47,124
0,5	1,571	1,75	5,488	3,75	11,781	8	25,133	16	50,265
0,6	1,885	2	6,283	4	12,566	8	28,274	18	56,449
0,7	2,199	2,25	7,069	4,5	14,137	10	31,416	20	62,832
0,8	2,513	2,5	7,854	5	15,708	11	34,558	22	69,115
0,9	2,827	2,75	8,639	5,5	17,279	12	37,699	24	75,398
1	3,142	3	9,425	6	18,850	13	40,841	27	84,823

Übersicht 2.91.: Standardisierte Modulreihe



Außengetriebe
Anordnung der Achsen $\alpha = 90^\circ$



Innengetriebe



Stirnrad mit Zahnstange



Bild 2.92.
Stirnräder, vollständige,
vereinfachte und sinnbildliche
Darstellung

Zylindrische Schraubenräder
Kreuzungswinkel $\alpha = 90^\circ$

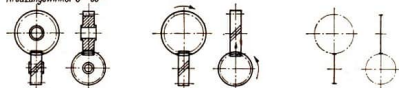


Bild 2.93.
Schraubenräder, vollständige,
vereinfachte und sinnbildliche
Darstellung

Zylinderschnecke

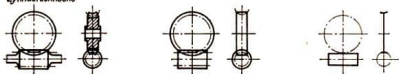


Bild 2.94.
Schnecken und Schneckenräder
vollständige, vereinfachte und
sinnbildliche Darstellung

Achsenwinkel $\delta_1 = 90^\circ$



Bild 2.95.
Kegelräder, vollständige,
vereinfachte und sinnbildliche
Darstellung

2.2.8. Zeichnungsarten

Die wichtigsten, nach ihrem Zweck benannten Zeichnungen sind:

- Entwurfszeichnung,
- Fertigungszeichnung mit Stückliste,
- Fertigungsmittelzeichnung,
- Aufstellungsplan,
- Fundamentzeichnung,
- Angebotszeichnung.

2.2.8.1. Entwurfszeichnung

In ihr legt der Konstrukteur seine grundlegenden Gedanken über das zu entwickelnde Objekt zeichnerisch fest. Dabei kommt es noch nicht auf alle Einzelheiten an. Da die Entwurfszeichnung zu Beratungen über die technische Ausführung des zu entwickelnden Objekts und als Grundlage für die weitere Konstruktionsarbeit herangezogen

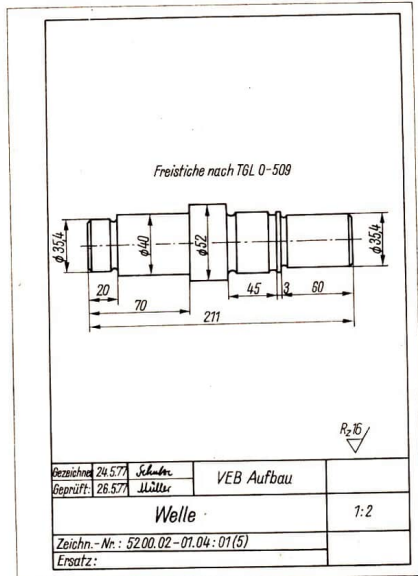


Bild 2.96.

Teilzeichnung. Die Teilzeichnung enthält nur ein Einzelteil, z. B. mit sämtlichen für die Fertigung notwendigen Maßen

wird, ist es notwendig, daß bereits alle wichtigen Funktionsmaße enthalten und aufeinander abgestimmt sind.

Wenn es zweckmäßig ist, kann die axonometrische Projektion gewählt werden.

2.2.8.2. Fertigungszeichnung und Stückliste

Fertigungszeichnungen dienen der unmittelbaren Produktionsvorbereitung, der Herstellung und Prüfung. Sie müssen daher alle dazu erforderlichen verbindlichen Angaben enthalten und fertigungsgerecht ausgeführt sein. Neben den sich aus der Funktion ergebenden Forderungen müssen die technologischen Bedingungen für die wirtschaft-

lichste Fertigung bei progressiver Einschätzung der Betriebsverhältnisse berücksichtigt sein. Eine fortgeschrittene Konstruktion ist u. a. durch die Anwendung vieler Standard- und Wiederholteile gekennzeichnet. Bei komplizierten Erzeugnissen muß auch dem stufenweisen Verlauf des Fertigungsprozesses Rechnung getragen sein, indem die Einzelteile zu Untergruppen, diese zu Gruppen und letztere zum kompletten Erzeugnis zusammengefügt werden. Demzufolge unterscheidet man nach dem Inhalt:

Teilzeichnung (Bild 2.96.),
Untergruppenzeichnung (Bild 2.97.),
Gruppenzeichnung,
Gesamtzeichnung.

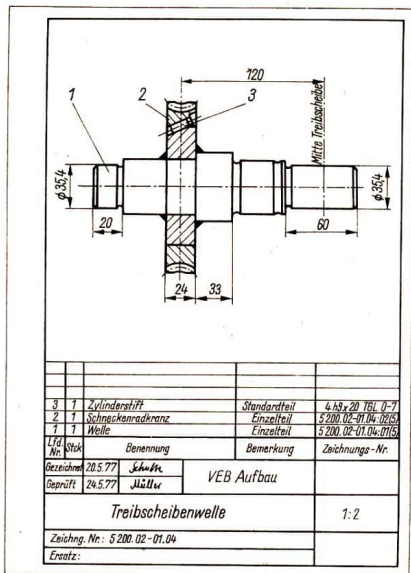


Bild 2.97.

Untergruppenzeichnung. Die Untergruppenzeichnung stellt mehrere Einzelteile dar, die zu einer Untergruppe zusammengefaßt werden können

Wenn erforderlich, können bei Erzeugnissen mit sehr vielen Teilen mehrere Gruppen zu Hauptgruppen kombiniert werden. In Gesamt-, Gruppen- und Untergruppenzeichnungen sind nur die Umrisse der jeweiligen Baueinheit dargestellt. Konstruktive Einzelheiten sind nur so weit gezeichnet, wie es der Zusammenbau erfordert. Ein Satz Fertigungszeichnungen ist nach dem Aufbau des betreffenden Maschinenbauerzeugnisses gegliedert. Außerdem gehören dazu:

Fertigungsmittelzeichnungen,
Aufstellungsplan,
Fundamentzeichnung.

Die Stücklisten geben Auskunft darüber, welche Gruppen bzw. Untergruppen und

Einzelteile zu der betreffenden Baueinheit gehören. Demnach enthalten:

Gesamtstückliste	{	Gruppen
		Einzelteile, die keiner Gruppe angehören (z. B. Verbindungsteile)
Gruppenstückliste	{	Untergruppen
		Einzelteile, die keiner Untergruppe angehören
Untergruppenstückliste		Einzelteile.

Ein einheitliches System für die *Zeichnungsbenummerung* ist nicht festgelegt. In der Regel besteht die Zeichnungsnummer aus einer Kennnummer und einer Ordnungsnummer.

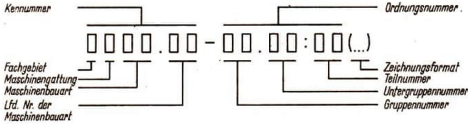


Bild 2.98.
Zusammensetzung
der Zeichnungsnummer

Im Maschinenbau ist die in Bild 2.98. angegebene Zusammensetzung üblich.

2.2.8.3. Fertigungsmittelzeichnungen

Fertigungsmittelzeichnungen dienen der Herstellung spezieller Werkzeuge, Vorrichtungen oder Meßzeuge, die zur Produktion der Erzeugnisse erforderlich sind. Die Fertigungsmittel werden in mittleren und großen Betrieben meist von spezialisierten Fachkräften entwickelt und entworfen. Die Zeichnungen müssen den an die Fertigungsmittel zu stellenden Anforderungen Rechnung tragen.

2.2.8.4. Aufstellungsplan

Der Aufstellungsplan enthält die notwendigen Zusammenbau-, Befestigungs- und Begrenzungsmaße sowie Angaben für die Aufstellung und Montage von Triebwerken, großen Maschinen oder vollständigen Maschinenanlagen. Je nach Größe des Objektes wird in den Maßstäben 1:5; 1:10; 1:20; 1:50 dargestellt.

2.2.8.5. Fundamentzeichnung

Die Fundamentzeichnung gibt Aufschluß über Ausführung, Gestaltung und Maße der Fundierung von Maschinen oder Maschinenanlagen. Um vorhandene Hohlräume deutlich zu zeigen, werden Schnittdarstellungen bevorzugt. Mitunter wird die Fundamentzeichnung mit dem Aufstellungsplan oder mit der Gesamtzeichnung der Maschine bzw. Anlage verbunden. Übliche Zeichnungsmaßstäbe: 1:10; 1:20; 1:50.

2.2.8.6. Angebotszeichnung

Die Angebotszeichnung soll in möglichst vereinfachter Darstellung einen Gesamtüberblick über das betreffende Erzeugnis

geben. Aus ihr sollen beispielsweise Raumbedarf, wichtige Anschlußmaße, Einstellmöglichkeiten, Leistungsbedarf, Wirkungsgrad und Masse hervorgehen. Je nach Größe des Objektes wird im Maßstab M 1:20; 1:50 oder 1:100 gezeichnet. Der Angebotszeichnung werden meist noch Beschreibungen mit weiteren Angaben beigegeben. Oftmals unterliegt die Angebotszeichnung bestimmten Vorschriften, die mit dem Auftraggeber bei der Ausschreibung vereinbart wurden.

2.3. Technisches Zeichnen für die Holzbearbeitung

Grundsätzlich gelten die in 2.1. und 2.2. bereits erläuterten Regeln. Im folgenden werden vorwiegend davon abweichende und spezielle Vorschriften dargelegt.

2.3.1. Holzarten

Einheimische Nadelhölzer (NH)

z. B. Tanne (TA)	Fichte (FI)
Kiefer (KI)	Lärche (LA)

Einheimische Laubhölzer (LH)

z. B. Eiche (EI)	Ahorn (AH)
Esche (ES)	Birke (BI)
Rüster (RU)	Birnbaum (BB)
Weißbuche (HB)	Linde (LI)
Rotbuche (BU)	Pappel (PA)
Erle (ER)	

Übersicht 2.99.: Kurzbezeichnungen für Holzarten

2.3.2. Vereinfachte Darstellung von Verbindungselementen

Verbindungselemente sind nach TGL 31091 vereinfacht oder sinnbildlich darzustellen (Übersicht 2.102.; vgl. auch Abschnitt 2.2.7.5., S. 43).



2.3.3. Schnittdarstellungen¹

2.3.3.1. Schraffuren und Symbole

Die Schnittflächen sind ohne Rücksicht auf die Holzart mit dünnen, unter annähernd 45° verlaufenden Freihandlinien zu schraffieren. Vollholz, das in Längsrichtung geschnitten ist, darf durch Längsschraffur als solches gekennzeichnet werden.

Holzart. Das zu verwendende Holz wird durch Eintragung des dafür festgelegten Kurzzeichens in die Schraffur angegeben.



Bild 2.100.
Kennzeichnung der Holzart

¹ Siehe auch Abschnitt 2.2.3.

Verbundplatten. Bild 2.101. zeigt Verbundplatten mit Vollholzmittellagen, quer zur Faserrichtung (X) geschnitten, und mit Wabenmittellagen, parallel (→) zur Faserrichtung geschnitten.

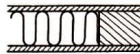


Bild 2.101.
Darstellung
von Verbundplatten

Beispiel	vereinfacht	Darstellung	sinnbildlich
Holzschrauben mit Halbrundkopf und Querschlitz			
Holzschraube mit Linsensenkkopf und Querschlitz			
Kerbnagel mit Halbrundkopf			
Nagel			
Nagelverbindung			

Übersicht 2.102.: Darstellung von Verbindungselementen und Verbindungsart nach TGL 31 091 (Beispiele)



Deckfurnier. Bild 2.103.a zeigt ein Deckfurnier (doppelt breite Vollinie etwa 20 mm lang) auf Längsholz (→) mit nach dem Furnieren angebrachtem Ankleber; oben Ahorn und unten Rotbuche-furnier.

Bei Deckfurnier auf Hirnholz werden oben und unten anstelle der Pfeile Kreuze (×) gezeichnet.

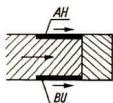


Bild 2.103.a
Darstellung des Deckfurniers

Sonstige Werkstoffe. Belagstoffe und Schichtpreßstoffe, Plastteile, Glas und Marmor werden nach Bild 2.103.b bis e dargestellt. Die Art des Belages wird durch Beschriftung



Bild 2.103.b
Darstellung von Linoleum



Bild 2.103.c
Darstellung von Plast



Bild 2.103.d
Darstellung von Glas



Bild 2.103.e
Darstellung von Marmor



Schaumgummiplatte
NK W profiliert TGL 13 851

Bild 2.103.f
Darstellung von
Gewebe

angegeben. Bei dünnwandigen Plastteilen erfolgt anstelle der Doppelschraffur die Angabe der Werkstoffart durch Text:

Gewebe und Polyesterfüllstoffe. Die Gewebeart wird durch Beschriftung angegeben. Füllstoffe und Dämmschichten sind ohne Rücksicht auf den Werkstoff mit schmalen, kreuzweise unter 45° verlaufenden Volllinien zu kennzeichnen. Die Füllstoffart geht ebenfalls aus der Beschriftung hervor (Bild 2.103.f).

2.3.3.2. Verschiedene Kennzeichnungen

Anstelle der engen Schraffur können die Flächen bei Beschlägen auch vollgeschwärzt werden. Schrauben und Nägel wurden bis vereinfacht durch eine schmale Strichpunktlinie oder ein Achsenkreuz unter Angabe der Kurzbezeichnung dargestellt (vgl. auch Übersicht 2.102.)

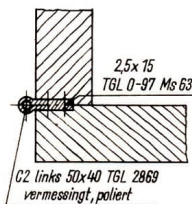


Bild 2.104.
Darstellung von Beschlägen

Polsterfedern. Bei geschnittenen Federkörpern oder Federkernen ist nur eine Polsterfeder darzustellen und durch Beschriftung zu kennzeichnen.

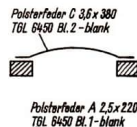
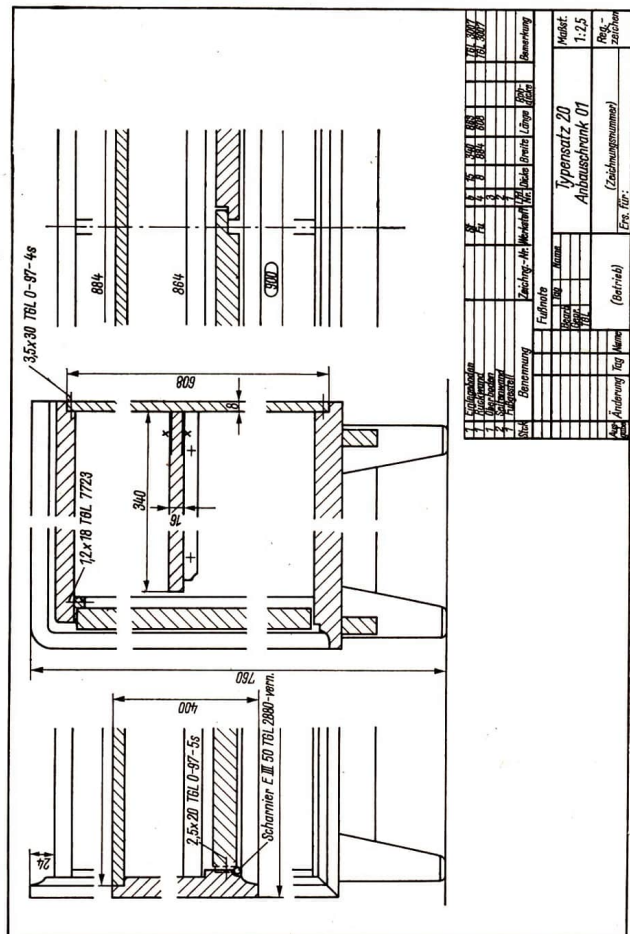


Bild 2.105.
Darstellung von Polsterfedern



Klebfugen. Kennzeichnung: rechtwinklig zur Klebfuge verlaufende kurze Freihandlinien.

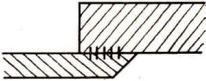


Bild 2.107. Darstellung von Klebfugen

2.3.4. Gesamtzeichnung

Die Gesamtzeichnung in der Holzindustrie faßt, wie diejenige im Maschinenbau, die einzelnen Baugruppen zusammen und gibt einen Gesamtüberblick über das zu fertigende Objekt. Sie enthält nur die für den Überblick und den Zusammenbau notwendigen Angaben und Maße, soweit sie nicht aus Gruppen-, Untergruppen- oder Teilzeichnungen zu entnehmen sind. In der Darstellungsweise unterscheidet sich die Gesamtzeichnung der Holzindustrie jedoch wesentlich von den Maschinenbauzeichnungen.

Es gelten hauptsächlich folgende Regeln:

1. Die notwendigen Schnittdarstellungen werden in die Vorder- oder Seitenansicht eingezeichnet. Dazu wird die Vorder- oder Seitenansicht unterbrochen dargestellt (Bild 2.106.). Zur Platzeinsparung dürfen bei symmetrischen Gegenständen die unterbrochen gezeichneten Ansichten an der Mittellinie oder wenig dahinter abgebrochen werden (Bild 2.106.). Endet die Darstellung an der Mittellinie, so sind die Enden derselben mit zwei kurzen schmalen Volllinien zu kreuzen (Bild 2.108.).
2. Bei großen Werkstücken werden die einzelnen Ausdehnungen ohne Anwendung von Bruchlinien unterbrochen dargestellt. Es wird aber entsprechend den natürlichen Abmessungen bemast (Bild 2.106.).

Im Bild 2.106. sind Draufsicht und Seitenansicht von rechts als Schnittdarstellungen in die Vorderansicht eingezeichnet.

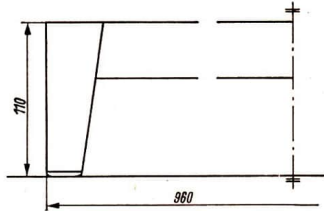


Bild 2.108. Teilweise Darstellung symmetrischer Gegenstände

2.4. Technisches Zeichnen in der Elektrotechnik

2.4.1. Darstellungsweise

Für das ausführliche, maßstabgerechte Zeichnen von elektrischen Maschinen, Geräten u. dgl. gelten die Regeln für technische Zeichnungen des Maschinenbaus. Die elektrische Wirkungsweise und Funktion eines Gerätes oder einer Anlage wird dagegen in *Schaltplänen* mit Hilfe von *Zeichen* (Schaltzeichen, Kennzeichen, Kurzbezeichnungen) dargestellt. Je nach dem Verwendungszweck sind verschiedene Arten von Schaltplänen standardisiert (vgl. Abschnitt 2.4.2.).

Auf Grund der historischen Entwicklung und der Besonderheiten der Leistungselektrik und der Informationselektrik gibt es teilweise unterschiedliche Darstellungen in diesen Zweigen der Elektrotechnik.

Schaltzeichen. Schaltzeichen sind Symbole zur zeichnerischen Darstellung der elektrischen Eigenschaften von Schaltelementen. Sie geben keine detaillierte Auskunft über den konstruktiven Aufbau sowie über die mechanischen und elektrischen Größen. Einflüsse mechanischer oder thermischer Art auf die elektrischen Eigenschaften von Schaltelementen werden aber durch *Kennzeichen* ausgewiesen (Übersicht 2.117.).

In der Leistungselektrik sind neben *ausführlichen Schaltzeichen* (Übersichten 2.115,



und 2.119.) auch *vereinfachte Schaltzeichen* (Übersicht 2.122.) zu verwenden. In Installationschaltplänen werden z. B. komplette elektrotechnische Geräte durch vereinfachte Schaltzeichen dargestellt. Der Zeichenaufwand wird so gesenkt, und die Übersichtlichkeit erhöht sich.

In der Informationselektrik können die charakteristischen Funktionen von Bauelementgruppen, Schaltungsstufen oder Geräten in stark vereinfachter Form als *Schaltungskurzzeichen* dargestellt werden (Übersicht 2.119.).

2.4.2. Schaltpläne

In Schaltplänen werden Wirkungsweise, Stromverlauf oder Leitungsverbindungen elektrischer Einrichtungen ausführlich oder vereinfacht unter Verwendung von Schalt-

zeichen dargestellt. Schaltpläne geben eine Übersicht zum Zwecke der Information oder dienen dem Herstellen von Schaltungen. Bei der Herstellung der Konstruktionsunterlagen für elektrotechnische Geräte oder Anlagen sind nur solche Schaltpläne anzufertigen, die zu einer klaren Darstellung erforderlich sind. Entsprechend dem Verwendungszweck sind Schaltpläne der folgenden Gruppen auszuwählen:

- Schaltpläne zur Übersicht
(Übersichtsschaltplan, Gruppenverbindungsplan u. a.);
- Schaltpläne zum Erkennen der Funktion
(Stromlaufplan, Geräteschaltplan, Wirkungsplan u. a.);
- Schaltpläne zur Fertigung
(Bauschaltplan, Anschlußplan u. a.);
- Schaltpläne für Netze und Leitungen
(Netzplan u. a.);
- Schaltpläne zur Installation
(Installationsplan u. a.).

Jedes im Schaltplan durch ein Schaltzeichen dargestellte Schaltelement, Gerät oder dgl. wird mit einer *Kurzbezeichnung*, bestehend aus Buchstaben und laufenden Nummern oder nur aus laufenden Nummern, versehen. Zusätzlich können auch elektrische Größen angegeben werden. In den Übersichten 2.113. und 2.121. sind Anschlußbezeichnungen und Kennbuchstaben für Schaltpläne der Leistungselektrik dargestellt; Schaltteilkurzzeichen für die Informationselektrik zeigt Übersicht 2.118.

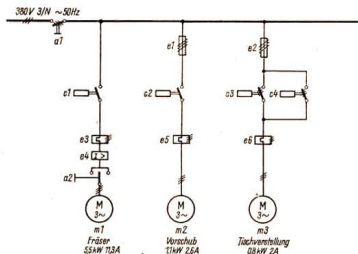
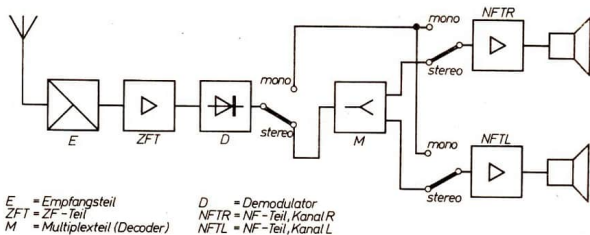


Bild 2.109.a Übersichtsschaltplan einer Fräsmaschine



E = Empfänger
ZFT = ZF-Teil
M = Multiplextextil (Decoder)
D = Demodulator
NFTR = NF-Teil, Kanal R
NFTL = NF-Teil, Kanal L

Bild 2.109.b Übersichtsschaltplan eines Stereoempfängers

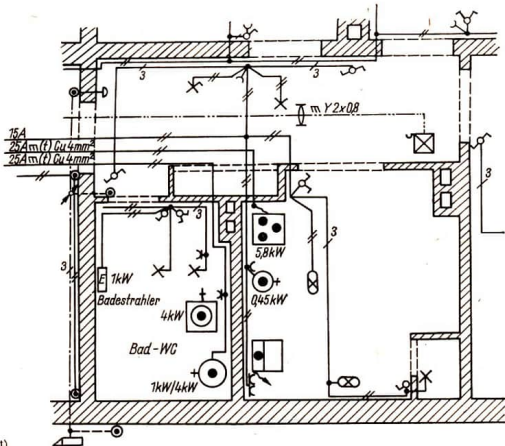


Bild 2.110.
Installationsplan (Ausschnitt)

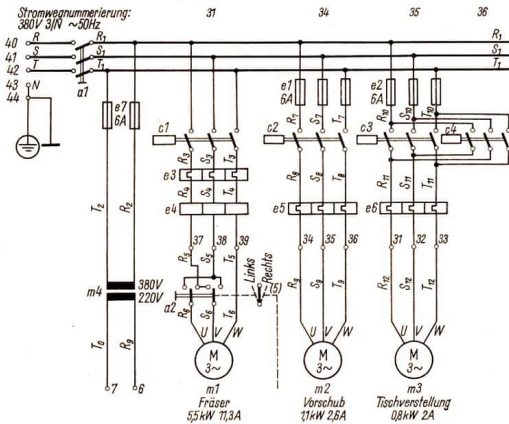


Bild 2.111.
Stromlaufplan einer Fräsmaschine (Ausschnitt)



2.4.2.1. Übersichtsschaltplan

Er gibt eine Übersicht über die Wirkungsweise verschiedener Schaltungen eines Gerätes oder einer Anlage, ohne auf Einzelheiten einzugehen. Vorzugsweise wird die einpolige Darstellung mit Schaltungskurzzeichen angewendet. Die Bilder 2.109.a und b zeigen Übersichtsschaltpläne der Leistungs- bzw. Informationselektrik.

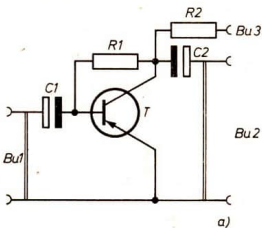
2.4.2.2. Netzplan

In ihm sind Leitungen, Verbindungen oder Streckenführungen eines Netzes oder von Teilen des Netzes einschließlich der zugehörigen Anlagen dargestellt. Die Teile des Netzes dürfen geradlinig ohne Rücksicht auf den Maßstab verbunden werden. Der Netzplan darf auch in eine Landkarte oder einen Stadtplan bzw. in Teile derselben maßstäblich eingetragen werden.

2.4.2.3. Installationsplan

Dieser Schaltplan zeigt die Leitungsverlegung einer Licht-, Kraft- oder Fernmeldeanlage. Im allgemeinen wird die Darstellung lagerichtig in eine Bauzeichnung eingetragen.

Beispiele von Schaltzeichen, die hauptsächlich in Installationsplänen von Licht- und Kraftanlagen vorkommen, zeigt Übersicht 2.120. Den Ausschnitt aus einem Plan für eine Hausinstallation zeigt Bild 2.110.



2.4.2.4. Stromlaufplan

Der Stromlaufplan ist eine nach Stromwegen aufgelöste Darstellung der Schaltung eines Gerätes oder einer Anlage. Die elektrischen Bauelemente werden durch ausführliche Schaltzeichen symbolisiert, Baugruppen und Geräte meist durch vereinfachte Schaltzeichen. Bild 2.111. zeigt den Stromlaufplan einer Fräsmaschine; in Bild 2.112.a ist der Stromlaufplan eines Transistor-NF-Verstärkers dargestellt.

Die Stromwege sollen im Stromlaufplan möglichst geradlinig und ohne Kreuzungen dargestellt werden. Auf die räumliche Lage und den mechanischen Zusammenhang der einzelnen Bauelemente und Teile braucht man keine Rücksicht zu nehmen. Klemmen und Lötstellen können eingetragen werden. Bei allpoliger Darstellung werden im allgemeinen alle Leitungen und Einzelheiten der Schaltung eingezeichnet. Dabei soll der funktionelle Ablauf vorzugsweise von links nach rechts und/oder von oben nach unten ersichtlich sein.

2.4.2.5. Bauschaltplan

Im Bauschaltplan sind die Einzelteile des Gerätes bzw. die einzelnen Geräte einer Gerätegruppe lagerichtig darzustellen. Der Bauschaltplan dient u. a. als Fertigungsunterlage für den Zusammenbau und als Grundlage für die Störungssuche. Er muß

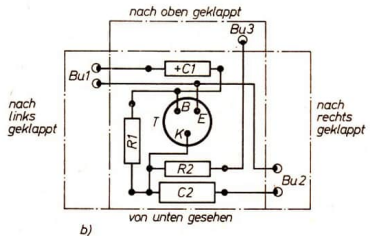


Bild 2.112. Transistor-NF-Verstärker;
a Stromlaufplan, b Bauschaltplan



Benennung	Anschlußbezeichnung	Beispiel
Gleichstrom positiver Leiter negativer Leiter Mittelleiter	+ (vormals P) - (vormals N) N (vormals Mp oder M)	+ _____ - _____ R _____ S _____ T _____ N _____
Drehstrom Hauptleiter Sternpunktleiter	R, S, T N (vormals Mp oder M)	
Drehstrommaschine Drehstrom, verkettet	U, V, W, N	
Drehstrom, unverkettet	U—X V—Y W—Z	

Übersicht 2.113.: Anschlußbezeichnungen in der Leistungselektrik (Auswahl)

Kennzeichen	Benennung	Kennzeichen	Benennung
2 — 110V	Zweileiter-Gleichstromsystem $U = 110 \text{ V}$		Dreiphasensystem in V-Schaltung desgl. in Sternschaltung
3N \sim 50Hz 380/220V	Vierleiter-Drehstromsystem ($N \triangleq$ Nulleiter) $f = 50 \text{ Hz}$,		desgl. in Dreieck- schaltung
	Wechselspannung, Wechselstrom im Bereich der Industriefrequenz		desgl. in offener Drei- eckschaltung
	Wechselstrom im Bereich der Tonfrequenz		desgl. in Zickzack- schaltung
	Wechselstrom im Bereich der Hoch- frequenz und Ultraschallfrequenz		

Übersicht 2.114.: Kennzeichen für Strom- und Spannungsarten und Wechselstromsysteme (Auswahl)

die schaltungstechnischen Angaben über Leitungen und Anschlußstellen innerhalb eines Gerätes oder zwischen Geräten einer Gerätegruppe enthalten.

Bild 2.112.b zeigt den Bauschaltplan für einen Transistor-NF-Verstärker.



Schaltzeichen Kennzeichen	Benennung	Schaltzeichen Kennzeichen	Benennung
	Leitung (allgemein)		Stegleitung mit Kupferleiter 2,5 mm* (TGL 200-1535)
	Schutzleitung (z. B. Erdung, Nullung)		Koaxialkabel
	Signalleitung		Erdverbindung
	Fernsprechleitung		Masseverbindung
	Rundfunkleitung		Buchse
	Unterirdische Leitung (z. B. Erdkabel)		Stecker
	Oberirdische Leitung (z. B. Freileitung)		Steckverbindung (einpoleig)
a)	Leitung a) auf Putz		Hochfrequenz-Koaxial-Steckverbindung (einpoleig)
b)	b) im Putz		Übertragungsrichtung von Strom-, Signal-, Energiefluß
c)	c) unter Putz		a) in einer Richtung
			b) in beiden Richtungen
	Leitung auf Isolatoren	c)	c) desgl., gleichzeitig
	Leitung im Isolierrohr		
a)	Isolierte Leitung a) für trockene Räume	a)	Leitungsführung / Speisung a) von oben, nach oben
b)	b) für feuchte Räume	b)	b) von unten, nach unten
c)	c) Kabel für außen und Erde	c)	c) nach unten und oben durchlaufend, Speisung nach oben

Übersicht 2.115.: Schaltzeichen für Leitungen und Leitungsverbindungen (Auswahl)



Darstellung		Benennung
allpolig	einpolig	
a) b) c) d)	 	a) einadrig b) zweiadrig c) dreiadrig d) n-adrig (z. B. $n = 4$)
		Kreuzung bei 3 Leitern; keine elektrische Verbindung
		Kreuzung bei 3 Leitern; nicht trennbare elektrische Verbindung
		Abzweigung bei 2 Leitern; trennbare elektrische Verbindung
		Zusammengefaßte Leitung

Übersicht 2.116.: Allpolige und einpolige Darstellung von Leitungen (Auswahl)

Kennzeichen	Benennung	Schaltzeichen	Benennung
a) b) c) d) e)	Verstellbarkeit a) einstellbar b) allgemein, insbesondere linear c) nicht linear d) stetig e) stufenweise	a) b) c) d) e)	Antriebe a) von Hand b) desgl. mit selbsttätigem Rückgang in Pfeilrichtung c) durch Nocken d) durch Kolben e) thermisch

Übersicht 2.117.: Kennzeichen für Verstellbarkeiten und Schaltzeichen für Schaltgliedantriebe (Auswahl)



Kurzzeichen	Bauelement	Kurzzeichen	Geräteart
Ba	Batterie	Em, E	Empfänger
Dr	Drossel	Fg	Fernsprechgerät
L, Sp	Spule	Gr	Gleichrichtergerät
T	Transistor	Se, S	Sender
W, R	Widerstand	Tg	Fernschreiber

Übersicht 2.118.: Schaltteilkurzzeichen in der Informationselektrik (Auswahl)

Schaltzeichen, ausführlich	Benennung	Schaltungskurzzeichen	Benennung
<p>a)</p> <p>b)</p>	<p>Widerstände</p> <p>a) allgemein</p> <p>b) spannungsabhängig, nichtlinear</p>		<p>Verstärker, 3stufig, Tonfrequenz</p>
<p>a)</p> <p>b)</p>	<p>Kondensatoren</p> <p>a) allgemein</p> <p>b) Elektrolytkondensator, gepolt</p>		<p>Kippgenerator</p> <p>Umsetzer, Analog-Digital</p>
<p>a)</p> <p>oder</p> <p>b)</p> <p>oder</p>	<p>Spulen</p> <p>a) allgemein</p> <p>b) Drosselspule mit Eisenkern</p>		<p>Fernsprechapparat, für W-Betrieb</p>
<p>a)</p> <p>b)</p> <p>c)</p>	<p>Halbleiter</p> <p>a) Transistor pnp</p> <p>b) Transistor npn</p> <p>c) Kapazitätsdiode</p>		<p>Fernmeßgerät, allgemein</p>
<p>a)</p> <p>b)</p> <p>c)</p>	<p>Schaltglieder</p> <p>a) Schließer, allgemein</p> <p>b) Öffner, Relaischaltglied</p> <p>c) Umschalter, allgemein</p>		<p>Wattstundenzähler</p>
			<p>Regler, allgemein</p>
			<p>Funkstelle, Sender</p>
			<p>Funkstelle, Empfänger</p>

Übersicht 2.119.: Schaltzeichen und Schaltungskurzzeichen (Auswahl)



Schaltzeichen, vereinfacht Benennung

Schaltzeichen, vereinfacht Benennung

	Ausschalter; einpolig
	Gruppenschalter; einpolig
	Serienschalter; einpolig
	Wechselschalter; einpolig
	Einfachsteckdose
	Einfachschutz- kontaktsteckdose
	Zweifachschutz- kontaktsteckdose
	Leuchte; allgemein
	Leuchte mit Schalter
	Leuchte mit Entladungslampe

	Elektromagnet; allgemein
	Elektroherd
	Waschmaschine
	Heißwasserbereiter
	Kühlschrank
	Fernsehempfangs- gerät
	Fernsprechgerät; fernberechtigt
	Wecker; allgemein
	Tastschalter
	Türöffner

Übersicht 2.120.: Schaltzeichen für Installationspläne (Beispiele)

Buchstabe	Geräteart	Buchstabe	Geräteart
a	Schalter	h	Sicht- und Hörmelder
b	Hilfsschalter	k	Kondensatoren und Drossel- spulen
c	Schütze	m	Maschinen und Transformatoren
d	Hilfsschütze	n	Gleichrichter und Batterien
e	Schutzeinrichtungen	p	Röhren und Verstärker
f	Meßwandler	r	Widerstände und Schnellregler
g	Meßgeräte	s	sonstige mechanische Geräte mit elektrischem Antrieb

Übersicht 2.121.: Kennbuchstaben in Schaltplänen der Leistungselektrik



Schaltzeichen		Benennung
ausführlich	vereinfacht	
		Spannungsmesser
		Einphasentransformator
		Drehstrommotor mit Käfigläufer

Übersicht 2.122.: Ausführliche und vereinfachte Schaltzeichen (Auswahl)

2.5. Weiterführende Literatur

2.5.1. Bücher

- [1] TGL-Taschenbuch 25: DDR-Standards; Technische Zeichnungen. Amt für Standardisierung der DDR.
- [2] TGL-Taschenbuch 37: DDR-Standards; Elektrotechnik, Bd. 2: Grundlagen. Teil 1: Schaltzeichen und Schaltpläne. Amt für Standardisierung der DDR.
- [3] Baerfacker, H.; H. Kummer: Technisches Zeichnen. Klassen 7 und 8. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1976.
- [4] Hildebrandt, S.; C. Markert: Zeichnungen und Darstellungen in der Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [5] Groh, W.: Die technische Zeichnung. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [6] Hinzmann, A.; G. Prüfer: Fachzeichnen Metall. Wissenspeicher für die Berufsausbildung. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [7] Liebscher: Fachzeichnen Informationselektrik. Lehrbuch für die Berufsbildung. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [8] Spanneberg, H.; R. Preißner; B. Wilke: Technisches Zeichnen. Leistungselektrik. Wissenspeicher für die Berufsbildung. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [9] Teml, A. (Hrsg.): Friedrich-Tabellenbücher. Elektrotechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1977.

- [10] Winkler, H.: Technisches Zeichnen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [11] Giewald, R.; D. Schwertner: Vorzugszahlen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964.

2.5.2. Verzeichnis wichtiger Standards

- | | |
|------------|--|
| TGL 2897 | Abweichungen für Maße ohne Toleranzangabe |
| TGL 3518 | Zeichenmaßstäbe |
| TGL 4664 | Zeichengeräte; Reißbretter |
| TGL 4665 | —; Reißschienen für Reißbretter |
| TGL 4666 | —; Zeichendreiecke |
| TGL 4667 | —; Winkelmesser |
| *TGL 8250 | Vorzugsmaße |
| *TGL 8275 | ISA-Passungen |
| | Bl. 1: Auswahlreihe für Maßtoleranzfelder |
| | Bl. 2: Auswahlreihe für Paßtoleranzen |
| TGL 8631 | Zeichnungssinnbilder für Blitzschutzanlagen |
| *TGL 9727 | Zeichnungen |
| | Bl. 1: Darstellung, allgemein |
| | Bl. 3: Maßeintragung |
| | Bl. 4: Schraffuren zur Kennzeichnung von Werkstoffen |
| | Bl. 5: Darstellung von Gewinden, Schrauben und Muttern |
| *TGL 15031 | Zeichnungen; Darstellung und Sinnbilder für Zahn- und Kettentriebe |



*TGL 15032	Zeichnungen; Verzahnungen, Angaben in Zeichnungen	TGL 16083	Schaltpläne zur Übersicht Bl. 1: Übersichtsschaltplan Bl. 2: Schutzrelaisplan Bl. 3: Gruppenverbindungsplan
*TGL 15033	Zeichnungen; Darstellung von Naben und Wellen mit Keil- oder Zahnprofil	TGL 16084	Schaltplan zum Erkennen der Funktion Bl. 1: Stromlaufplan Bl. 2: Funktionsschaltplan Bl. 3: Geräteschaltplan
*TGL 15103	Zeichnungen; Darstellung und Sinnbilder für Federn	TGL 16085	Schaltpläne zur Fertigung Bl. 1: Bauschaltplan
*TGL 16005	Elektrotechnik; Schaltzeichen Allgemeine Kennzeichen	*TGL RGW 209-75	ESKD; TZ; Bezeichnung von Werkstoffquerschnitten
*TGL 16006	Elektrotechnik; Schaltzeichen Kennzeichen für Spannungs-, Strom- und Schaltarten	*TGL 31006	ESKD des RGW; Schriftfelder; Gestaltung, Ausführung, Anwendung
*TGL 16007	Elektrotechnik; Schaltzeichen Leitungen und Leitungsverbindungen	*TGL 31031	ESKD; TZ; Zeichnungsblatt; /01: Gestaltung /02: Formate
*TGL 16008	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Widerstände, allgemein	*TGL 31032	Konstruktionsdokumentation; TZ; Maßstäbe
*TGL 16009	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Kondensatoren, allgemein	*TGL 31033	Konstruktionsdokumentation; TZ; Linien; /01: Linienarten, Linienbreiten, Ausführung
*TGL 16010	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Spulen und Transformatoren, allgemein Bl. 2: Spulen und Transformatoren, Meßwandler	*TGL 31034	Konstruktionsdokumentation; TZ; Schrift; /01: Grundsätze /02: Lateinisches Alphabet /05: Ziffern und Zeichen
*TGL 16011	Elektrotechnik; Schaltzeichen Antennen	*TGL 31035	Konstruktionsdokumentation; TZ; Projektionen; /02 Axonometrische Projektionen
*TGL 16012	Elektrotechnik; Schaltzeichen Ableiter und Sicherungen	*TGL 31045	Konstruktionsdokumentation; TZ; Vereinfachtes Darstellen und Bemaßen von Löchern und Senkungen
*TGL 16013	Elektrotechnik; Schaltzeichen elektrochemische und elektrothermische Quellen	*TGL 31050	Konstruktionsdokumentation; TZ; Oberflächenrauheit, Angaben in Zeichnungen
*TGL 16014	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Röhren, allgemein Bl. 3: Röhren, Höchstfrequenztechnik, Beispiele	*TGL 31091	Konstruktionsdokumentation; TZ; Vereinfachtes und sinnbildliches Darstellen lösbarer Verbindungen
*TGL 16016	Elektrotechnik; Schaltzeichen Halbleiter		
*TGL 16018	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Höchstfrequenzelemente Bl. 2: Höchstfrequenzelemente, Beispiele		
*TGL 16020	Elektrotechnik; Schaltzeichen Bl. 1: Schaltgerätetechnik, allgemein		
*TGL 16025	Elektrotechnik; Schaltzeichen Maschinen		
*TGL 16026	Elektrotechnik; Schaltzeichen Meßinstrumente, Meßgeräte und Uhren		
*TGL 16032	Elektrotechnik; Schaltzeichen Elektroakustik		
TGL 16081	Schaltpläne der Elektrotechnik		

Den mit * bezeichneten Standards liegen Empfehlungen der Kommissionen des RGW oder der Konferenz der Standardisierungsorgane der sozialistischen Länder zugrunde.

ESKD bedeutet Einheitliches System der Konstruktionsdokumentation.

TZ bedeutet Technische Zeichnungen.



3. Technische Mechanik

verfaßt von Dr. O. Hahm
und Dr. K. Krause

Verwendete Formelzeichen

A	Auflagerkraft	Q	Querkraft
A	Fläche, Querschnittsfläche	r	Radius
A_n	Teilfläche	R	Reibungskraft
$A_x; A_y$	Kraftkomponenten der Auflagerkraft A	R	resultierende Kraft
a	Beschleunigung	$R_x; R_y; R_z$	Kraftkomponenten von R in x -, y - oder z -Richtung
a_m	mittlere Beschleunigung	s	Wegstrecke
$a_x; a_y; a_z$	Beschleunigung in x -, y - oder z -Richtung	t	Zeit
a_t, a_n	Tangential- und Normalbeschleunigung	U	Umdrehung
B	Auflagerkraft	v	Geschwindigkeit
$B_x; B_y$	Kraftkomponenten der Auflagerkraft B	v_0	Anfangsgeschwindigkeit
d	Durchmesser	v_m	mittlere Geschwindigkeit
E	Elastizitätsmodul	V	Volumen
f	Durchbiegung	V_n	Teilvolumen
f	Reibungszahl bei Rollreibung	W_A	Arbeit
F	Kraft	W_{kin}	kinetische Energie
F_n	Teilkraft	W_{pot}	potentielle Energie
$F_x; F_y; F_z$	Kraftkomponenten von F in x -, y - oder z -Richtung	W_b	Widerstandsmoment gegen Biegung
F_t	Tangentialkraft	W_t	Widerstandsmoment gegen Torsion
F_N	Normalkraft	W_z	Widerstandsmoment, bezogen auf die z -Achse
F_k	Knickkraft	X	Kraftkomponente in x -Richtung
G	Gewicht	x_s	Koordinate des Schwerpunktes
g	Erdbeschleunigung	Y	Kraftkomponente in y -Richtung
h	Höhe	y_s	Koordinate des Schwerpunktes
Θ	Massenträgheitsmoment	Z	Kraftkomponente in z -Richtung
$J_x; J_y; J_z$	äquatoriales Flächenträgheitsmoment, bezogen auf die x -, y - oder z -Achse	z_s	Koordinate des Schwerpunktes
J_s	äquatoriales Flächenträgheitsmoment, bezogen auf die Schwerachse	ϵ	Winkelbeschleunigung
k	Anzahl der Knoten (Fachwerk)	ϵ	Dehnung
l	Länge	λ	Schlantheit
l_n	Teillänge	ν	Sicherheit
l_k	Knicklänge	μ_0	Reibungszahl bei Ruhereibung
m	Masse	μ_1	Reibungszahl bei Gleitreibung
M	Moment, Drehmoment	μ_1'	Reibungszahl bei Lagerreibung
M_R	resultierendes Moment	ρ	Krümmungsradius
$M_x; M_y; M_z$	Moment, bezogen auf die x -, y - oder z -Achse	σ	Normalspannung
M_b	Biegemoment	σ_d	Druckspannung
M_t	Torsionsmoment	σ_z	Zugspannung
M_k	Kippmoment	σ_b	Biegespannung
M_{st}	Standmoment	σ_E	Spannung an der Elastizitätsgrenze
n	Drehzahl	σ_B	Bruchspannung
N	Normalkraft	$\sigma_{zul b}$	zulässige Biegespannung
P	Leistung	σ_K	Knickspannung
p	Flächenpressung	τ	Tangentialspannung
q	gleichmäßig verteilte Last	τ_{zul}	zulässige Schubspannung
		τ_a	Scherspannung
		τ_t	Torsionsspannung
		ω	Winkelgeschwindigkeit



Aufgaben und Bereiche

Die Mechanik ist ein Teilgebiet der Physik. Sie ist die Lehre von den Kräften und den Wirkungen der Kräfte. Die *technische Mechanik* wendet die Erkenntnisse der Mechanik auf technische Probleme an.

Mit Hilfe der technischen Mechanik werden z. B. notwendige Abmessungen für ein Tragwerk bestimmt, werden die Kräfte berechnet, die zur Erzeugung einer bestimmten Bewegung benötigt werden. Sie wird vor allem im Maschinenbau, im Stahlbau und im Bauwesen angewendet.

Die Mechanik wird gegliedert in die Mechanik der festen Körper, Flüssigkeiten und Gase.

Diese Gebiete unterteilen sich jeweils noch in die *Statik*, die das Gleichgewicht der Kräfte sowie deren Zusammensetzung und Zerlegung untersucht, und in die *Dynamik*, die die Geschwindigkeits- und Bahnänderung behandelt.

Die technische Mechanik vereinfacht bei ihren Untersuchungen die Eigenschaften der Körper. So genügt es für viele Untersuchungen, die festen Körper als starr zu betrachten, d. h., es werden die Formänderungen, die infolge der wirkenden Kräfte eintreten, vernachlässigt (Mechanik starrer Körper). Die Mechanik der elastischen Körper dagegen berücksichtigt die Formänderung; die Mechanik der elastischen festen Körper wird auch als Festigkeitslehre bezeichnet.

Der folgende kurze Abriss enthält die Bereiche Mechanik der starren Körper und Mechanik der elastischen festen Körper (Festigkeitslehre). Zu den anderen Bereichen siehe [1], [3], [6].

3.1. Mechanik starrer Körper

3.1.1. Grundlagen

3.1.1.1. Kräfte und ihre Darstellung

Neben den Grundbegriffen *Länge* und *Zeit* benötigt die technische Mechanik vor allem den Grundbegriff der *Kraft*. Kräfte können nicht unmittelbar wahrgenommen werden. Man erkennt sie an ihren Wirkungen, z. B. an den eintretenden Formänderungen oder Beschleunigungen.

Es können unterschieden werden:

Volumenkräfte, z. B. die Schwerkraft	
	in Nmm^{-3}
Flächenkräfte, z. B. Auflagerkräfte	
	in Pa oder Nmm^{-2}
Linienkräfte	in Nmm^{-1}
Einzelkräfte	in N

Die technische Mechanik faßt die Volumen- und Flächenkräfte zu Einzelkräften zusammen. Wird die Bezeichnung *Kraft* ohne Zusatz verwendet, so ist darunter eine Einzelkraft zu verstehen.

Linienkräfte und Einzelkräfte sind Vereinfachungen. In Wirklichkeit sind diese Kräfte immer über eine, wenn auch mitunter sehr kleine Fläche verteilt.

Außerdem werden unterschieden: eingeprägte Kräfte und Reaktionskräfte. Eingeprägte Kräfte (Belastungen, Eigengewicht) rufen die Reaktionskräfte (Auflagerkräfte) hervor.

Außere Kräfte und *innere Kräfte* siehe Seite 80.

Kräfte sind Vektoren, d. h., ihre Größe ist untrennbar mit einer Richtung verbunden. In den folgenden Ausführungen wird die *zeichnerische* Darstellung der jeweiligen Kraftsysteme rechnerisch erfaßt.

Eine Einzelkraft F ist genau festgelegt, wenn ihre Größe, ihre Richtung, ihr Richtungssinn und ihr Angriffspunkt bekannt sind. Zur Unterstützung der Anschaulichkeit werden Kräfte durch Pfeile dargestellt, die Länge des Pfeiles symbolisiert mit Hilfe eines Kräftemaßstabes die Größe der Kraft, die Richtung des Pfeiles gibt die Richtung und die Pfeilspitze den Richtungssinn der Kraft an. Als Kräftemaßstab wird z. B. gewählt: $1 \text{ cm} \triangleq n \text{ N}$.

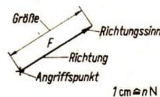


Bild 3.1. Zeichnerische Darstellung einer Kraft

Bei Prinzipskizzen wird zum Teil der Kräftemaßstab vernachlässigt. Mit Hilfe trigonometrischer Funktionen kann die zeichnerische Darstellung rechnerisch erfaßt werden (siehe Seite 75 ff.). Weiterhin ist es möglich, das Zusammenwirken von Kräften mittels der Vektoralgebra zu bestimmen.



3.1.1.2. Grundgesetze der Mechanik

Trägheitsgesetz. Jeder Körper beharrt in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung, wenn die resultierende Kraft aus allen auf ihn wirkenden Kräften Null ist (1. Newtonsches Prinzip).

Gegenwirkungsgesetz. Wirkt auf einen Körper eine Kraft aus seiner Umgebung ein, dann wirkt der Körper mit einer gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kraft zurück (3. Newtonsches Prinzip). *Actio = reactio.*

Grundgesetz. Die Kraft F ist der Beschleunigung a proportional. Sie wirkt in Richtung der Bewegung.

Als Faktor wirkt die Masse m .

$$F = m \cdot a$$

Dieser Zusammenhang wird auch als das Grundgesetz der Mechanik oder 2. Newtonsches Prinzip bezeichnet.

3.1.1.3. Zentrale ebene Kraftsysteme

Definition. Greifen zwei oder mehr Kräfte an einem Punkt an und liegen diese Kräfte in einer Ebene, so wird diese Anordnung als ein zentrales ebenes Kraftsystem bezeichnet.

Ermittlung der Resultierenden. (Addition von Kräften.) Um die gemeinsame Wirkung aller Kräfte zu erkennen, ist es notwendig, die resultierende Kraft – kurz Resultierende genannt – zu bestimmen.

Die Resultierende kann auf graphischem oder rechnerischem Wege ermittelt werden. Der rechnerische Weg erzielt eine höhere Genauigkeit. Zwei Kräfte F_1 und F_2 , die in einem Punkt angreifen, können zu einer resultierenden Kraft R zusammengefaßt werden, indem die graphische Darstellung der beiden Kräfte zu einem Parallelogramm ergänzt wird. Die im Angriffspunkt beginnende Diagonale ist die resultierende Kraft R .

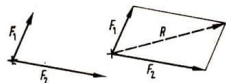


Bild 3.2.
Kräfteparallelogramm,
1 cm \triangleq n N

R hat die gleiche Wirkung wie F_1 und F_2 . Das entstehende Parallelogramm wird als Kräfteparallelogramm bezeichnet.

Das Zusammenfassen zweier Kräfte durch das Parallelogramm der Kräfte ist mathematisch nicht beweisbar. Seine Richtigkeit wurde durch die Praxis belegt.

Zur Vereinfachung genügt es, ein halbes Kräfteparallelogramm, d. h. ein Kräfte-dreieck, zu zeichnen.

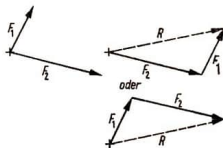


Bild 3.3.
Kräfteck



Bild 3.4.
Winkel am
Kräfteck

Aus der graphischen Darstellung kann die *rechnerische Lösung* abgeleitet werden.

Nach dem Kosinussatz ist

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1 F_2 \cos (180^\circ - \alpha)$$

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \alpha}$$

Der Sinussatz führt zu

$$\frac{\sin \beta}{F_2} = \frac{\sin (180^\circ - \alpha)}{R}$$

$$\sin \beta = \frac{F_2}{R} \cdot \sin \alpha$$

Aus mehreren Kräften $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ wird durch wiederholte Anwendung des Satzes vom Kräfteparallelogramm die Resultierende R ermittelt.

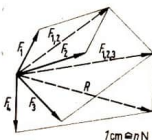


Bild 3.5.
Ermittlung der Resultierenden durch wiederholte Anwendung des Kräfteparallelogramms



Diese Darstellung ist umständlich und kann vereinfacht werden:

Die einzelnen Kräfte eines ebenen zentralen Kraftsystems werden von einem beliebigen Punkt aus in beliebiger Reihenfolge nacheinander in einem Kräftemaßstab gezeichnet. Die Verbindung des Ausgangspunktes zu der Spitze des letzten Kraftpfeiles ergibt dann die resultierende Kraft. Aus dem Kräfteck, auch Kräfteplan genannt, wird die resultierende Kraft durch Parallelverschiebung in den Lageplan übertragen.

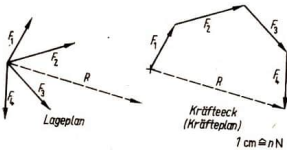


Bild 3.6. Ermittlung der Resultierenden mit Hilfe des Kräftecks

Da das Kräfteparallelogramm auch zur Zerlegung einer Kraft in zwei Kräfte vorgegebener Richtung verwendet werden kann, ergibt sich aus dieser Darstellung folgende rechnerische Lösung:

Die einzelnen Kräfte können jeweils in zwei Teilkraften in der Richtung der x - und y -Achse zerlegt werden (siehe Seite 76).

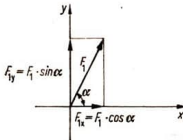


Bild 3.7.
Zerlegung einer Kraft in ihre x - und y -Komponente

F_{1y} und F_{1x} haben gemeinsam die gleiche Wirkung wie F_1 .
Aus Bild 3.8. folgt für das zentrale ebene Kraftsystem

$$R_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \dots + F_{ny};$$

$$R_y = \sum_{k=1}^n F_{ky}.$$

$$R_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \dots + F_{nx};$$

$$R_x = \sum_{k=1}^n F_{kx}.$$

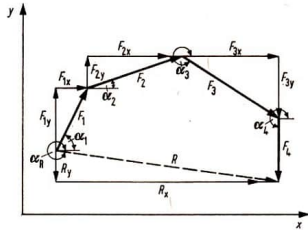


Bild 3.8. Ansatz zur rechnerischen Ermittlung der Resultierenden

Nach dem Satz des Pythagoras ist

$$R = \sqrt{R_y^2 + R_x^2}.$$

Unter Berücksichtigung von Bild 3.7. ist

$$R_y = F_1 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot \sin \alpha_2 + F_3 \cdot \sin \alpha_3 + \dots + F_n \cdot \sin \alpha_n;$$

$$R_x = F_1 \cdot \cos \alpha_1 + F_2 \cdot \cos \alpha_2 + F_3 \cdot \cos \alpha_3 + \dots + F_n \cdot \cos \alpha_n$$

oder

$$R_y = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \sin \alpha_k; \quad R_x = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \cos \alpha_k.$$

Die Richtung und der Richtungssinn sind dann durch

$$\tan \alpha_R = \frac{R_y}{R_x}$$

gegeben.

Dabei wird α jeweils entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn von der positiven x -Achse aus gemessen.

Kräfte mit gleicher Richtung können durch direkte Addition zusammengefaßt werden. Die Resultierende R ist die algebraische Summe der Einzelkräfte. Dabei werden Kräfte mit entgegengesetztem Richtungssinn mit einem entgegengesetzten Vorzeichen $(-)$ versehen, $\cos 180^\circ = -1$.

Zerlegung. Eine Kraft kann in zwei Kräfte vorgegebener Richtung zerlegt werden, indem vom gemeinsamen Schnittpunkt ausgehend ein Kräfteparallelogramm konstruiert wird.

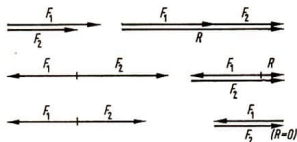


Bild 3.9. Addition von Kräften gleicher Richtung

iert wird. Die zu zerlegende Kraft wird zur Diagonalen, und die gesuchten Teilkräfte bilden die Seiten des Kräfteparallelogramms (Umkehrung des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte).

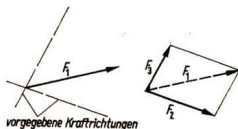


Bild 3.10. Zerlegung einer Kraft in zwei Kräfte vorgegebener Richtungen

Eine Zerlegung einer Kraft in einem ebenen zentralen Kraftsystem in drei oder mehr Kräfte vorgegebener Richtung ist möglich, aber nicht eindeutig. Es entstehen unendlich viele Lösungen.

Gleichgewicht. In einem ebenen zentralen Kraftsystem herrscht Gleichgewicht, wenn die Kräfte sich gegenseitig aufheben, d. h. die resultierende Kraft $R = 0$ wird.

Graphische Lösung: Kräfteeck geschlossen. Rechnerische Lösung:

$$R = 0$$

oder

$$R_y = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \sin \alpha_k = 0$$

und

$$R_x = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \cos \alpha_k = 0$$

kurz

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0.$$

($\sum X$ ist zu lesen: Summe aller Kraftkomponenten in x -Richtung.)

3.1.1.4. Allgemeine ebene Kraftsysteme

Definition. Liegen zwei oder mehr Kräfte in einer Ebene und haben sie *keinen gemeinsamen Angriffspunkt*, so handelt es sich um ein allgemeines ebenes Kraftsystem. Es empfiehlt sich, die Kräfte auf einer ebenen, verhältnismäßig dünnen, beliebig begrenzten, frei beweglichen *starrten Scheibe* wirken zu sehen.

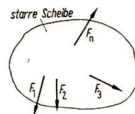


Bild 3.11. Allgemeines ebenes Kraftsystem

Verschiebbarkeit. Um den Satz vom Parallelogramm der Kräfte anwenden zu können, müssen jeweils zwei Kräfte miteinander zum Schnitt gebracht werden. Dazu ist es notwendig, vorauszusetzen, daß diese Kräfte in ihrer Wirkungslinie verschoben werden können, ohne daß sich ihre Wirkung ändert. Diese Voraussetzung kann nur für Kräfte am starren Körper angenommen werden, für den deformierbaren Körper trifft sie nicht zu.

In den nächsten Abschnitten wird die *Linienflüchtigkeit* der zu untersuchenden Kräfte vorausgesetzt.

Bei einer Parallelverschiebung von Kräften am starren Körper tritt ein Versetzungsmoment hinzu (siehe Seite 78).

Graphische Ermittlung der Resultierenden. Mit Hilfe der Verschiebung von Kräften in ihrer Wirkungslinie kann durch *wiederholte Anwendung des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte* die resultierende Kraft graphisch gewonnen werden (Bild 3.12., Seite 77).

Die Kräfte F_1, F_2, F_3 und F_n werden nacheinander zusammengefaßt. Zuerst wird im Lageplan der Schnittpunkt der Kräfte F_1 und F_2 ermittelt und im Kräfteeck die Teilresultierende $F_{1,2}$ zeichnerisch bestimmt. Die Kraft $F_{1,2}$ geht durch den Schnittpunkt P_1 , ihre Richtung und ihr Richtungssinn werden aus dem Kräfteplan in den Lageplan übertragen. Damit hat die Kraft $F_{1,2}$ die gleiche Wirkung wie die Kräfte F_1 und F_2 . $F_{1,2}$ wird nun mit F_3 zum Schnitt gebracht usw.

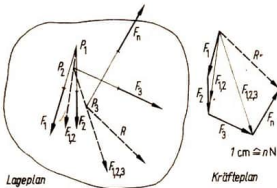


Bild 3.12. Ermittlung der Resultierenden durch wiederholte Anwendung des Kräfteparallelogramms

Dieses Verfahren kann nur dann angewendet werden, wenn sich die einzelnen Schnittpunkte noch auf dem Zeichenpapier befinden. Sind zwei der Kräfte einander parallel, so versagt dieses Verfahren. Die Ermittlung der resultierenden Kraft nach dem *Seileckverfahren* führt in jedem Fall zu einem Ergebnis.

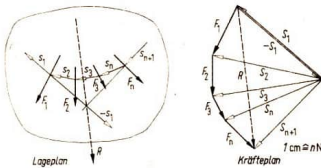


Bild 3.13. Ermittlung der Resultierenden mit Hilfe des Seileckverfahrens

Nach dem Seileckverfahren werden dem Kraftsystem zwei gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte S_1 und $-S_1$ hinzugefügt. Diese Kräfte heben sich untereinander auf, verändern also nicht den Gesamtwert des Kraftsystems. In der gleichen Weise wie in dem vorstehenden Verfahren werden die Kräfte $S_1, F_1, F_2, F_3, F_n, -S_1$ nacheinander zusammengefaßt.

Zuerst wird S_1 mit F_1 im Kräfteplan zu der Teilresultierenden S_2 vereinigt. Die aus S_1 und F_1 resultierende Kraft S_2 muß im Lageplan durch den Schnittpunkt von s_1 mit F_1 gehen.

Die Kraft S_2 wird im Kräfteplan mit F_2 zusammengefaßt, und es entsteht die Teilresultierende S_3 . Diese Kraft muß im Lageplan durch den Schnittpunkt von s_2 und F_2 gehen. In der gleichen Weise werden die Teilresultierenden S_3, S_n und S_{n+1} ermittelt. S_{n+1} ergibt dann mit der Kraft $-S_1$ die Resultierende R . Dabei hat die Resultierende R die gleiche Größe, Richtung und Richtungssinn wie die Resultierende der Kräfte F_1, F_2, F_3 und F_n allein. Da die Kräfte $-S_1$ und S_{n+1} zusammen die

Kraft R ergeben, muß R im Lageplan durch den Schnittpunkt von $-s_1$ und s_{n+1} gehen. Damit ist die Resultierende R nach Größe, Richtung und Richtungssinn bestimmt.

Die Größe für S_1 und $-S_1$ kann beliebig gewählt werden, da sie keinen Einfluß auf das Gesamtergebnis hat, sondern nur eine Hilfsgröße ist. Die Wirkungslinien von s_1 bis s_{n+1} im Lageplan werden auch als Seilstrahlen und die entstehende Figur als Seileck bezeichnet, da ein Seil, das in einem Punkt der Strahlen s_1 und s_{n+1} aufgehängt ist und von den entsprechenden Kräften beansprucht wird, diese Form annimmt. Der Schnittpunkt von S_1 und S_{n+1} im Kräfteplan ist der Pol, und die Verbindungslinien des Kräftecks mit dem Pol sind die Polstrahlen. Da S_1 beliebig groß ist, kann auch der Pol beliebig gewählt werden.

Nach dem Seileckverfahren wird also neben dem Lageplan – in dem die Kräfte nicht nach einem Kräftemaßstab eingetragen sein müssen – ein Kräfteplan gezeichnet. Darauf wird ein Pol gewählt und mit den Eckpunkten des Kräfteplanes verbunden. Im Lageplan werden die Seilstrahlen (s) parallel zu den Polstrahlen (S) eingetragen. Schließen zwei Polstrahlen eine Kraft im Kräfteplan ein, so schneiden sie sich im Lageplan auf dieser Kraft. Die Resultierende liegt dann auf dem Schnittpunkt des ersten und letzten Seilstrahles.

Das Seileckverfahren gestattet es auch, die Resultierende von parallelen Kräften zeichnerisch zu ermitteln.

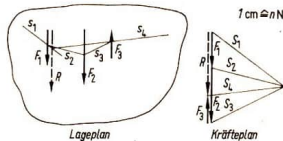


Bild 3.14. Ermittlung der Resultierenden von parallelen Kräften

Moment und Momentensatz. Außer der Größe, der Richtung und dem Richtungssinn ist die Lage einer Kraft zu einem *realen* bzw. *angenommenen* Drehpunkt von besonderer Bedeutung.

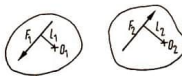


Bild 3.15. Moment einer Kraft



Wenn bei O_1 ein Drehpunkt ist, dann versucht die Kraft F_1 die starre Scheibe um diesen Drehpunkt zu drehen. Experimentell kann nachgewiesen werden, daß diese Drehkraft – das Moment – mit dem Abstand der Kraft vom Drehpunkt wächst.

Als *Moment einer Kraft F_1 in bezug auf einen Punkt O* wird das Produkt aus dem absoluten Betrag dieser Kraft und dem senkrechten Abstand zu diesem Punkt l_1 bezeichnet. Das Moment wird auch Drehmoment oder statisches Moment genannt. Im einengenden Sinne ist der Abstand zum Drehpunkt als Hebel oder Hebelarm bekannt. Die Einheit des Momentes ist das Nm. Im allgemeinen wird eine Drehrichtung, die entgegengesetzt dem Uhrzeiger verläuft, als positiv angesetzt.

$$M_1 = + F_1 \cdot l_1; \quad M_2 = - F_2 \cdot l_2$$

Die Resultierende R hat auch in bezug auf das Drehmoment die gleiche Wirkung wie die Einzelkräfte.

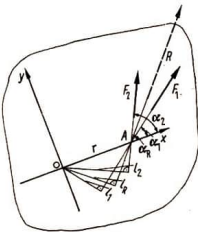


Bild 3.16.
Ansatz
zum Beweis des
Momentsatzes

$$M_1 + M_2 = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 = F_1 \cdot r \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot r \cdot \sin \alpha_2.$$

Da $F_1 \cdot \sin \alpha_1 = F_{1y}$ ist, wird

$$M_1 + M_2 = r \cdot F_{1y} + r \cdot F_{2y}.$$

Es werden also nur die Komponenten der Kräfte in y -Richtung wirksam, die senkrecht zur Verbindung $O-A$ stehen. Die Komponenten in der x -Richtung gehen durch den Drehpunkt, besitzen demnach kein Drehmoment. Für die Resultierende ergibt sich analog

$$M_R = R \cdot l_R = R \cdot r \cdot \sin \alpha_R$$

$$M_R = r \cdot R_y.$$

Nach Bild 3.8. war $R_y = F_{1y} + F_{2y}$, demnach ist $M_R = M_1 + M_2$.

Das statische Moment der Resultierenden R ist gleich der algebraischen Summe der statischen Momente der Einzelkräfte (Momentensatz).

Dieser Momentensatz ist für die technische Mechanik ein wichtiges Hilfsmittel.

Kräftepaare und Versetzungsmoment. Im allgemeinen ebenen Kraftsystem treten außer Einzelkräften auch Kräftepaare auf. Ein Kräftepaar besteht aus zwei gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräften, die in einem bestimmten Abstand voneinander wirken. Ihre Resultierende ist $R = 0$. Dagegen besitzen sie ein feststehendes Drehmoment, das unabhängig vom Bezugspunkt ist, d. h., sie können, ohne daß sich der Wert ändert, in der Ebene verschoben werden.

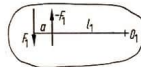


Bild 3.17.
Ansatz zur Ermittlung
des Momentes
eines Kräftepaars

In bezug auf den Punkt O_1 wird

$$M = F_1 (a + l_1) - F_1 l_1$$

$$M = F_1 \cdot a + F_1 \cdot l_1 - F_1 \cdot l_1$$

$$M = F_1 \cdot a.$$

Das Drehmoment eines Kräftepaars ist gleich dem Produkt aus der absoluten Größe einer Kraft und dem Abstand der beiden Kräfte. Dieses Moment ist an keinen Bezugspunkt gebunden. Diese Erkenntnis gestattet eine Parallelverschiebung von Kräften. Eine Kraft F_1 kann parallel verschoben werden, wenn man ihr zwei Kräftepaare hinzufügt.

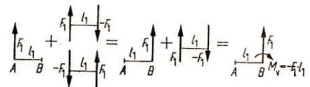


Bild 3.18. Versetzungsmoment bei Parallelverschiebung einer Kraft

Zwei Kräftepaare, die sich wechselseitig aufheben, werden mit der Einzelkraft zusammengefaßt. Es entsteht eine parallel verschobene Einzelkraft und ein Versetzungsmoment M_v .



Rechnerische Ermittlung der Resultierenden. Die resultierende Kraft kann auch *rechnerisch* gewonnen werden. Zur Vereinfachung wird das allgemeine ebene Kraftsystem in ein rechtwinkliges Koordinatensystem gelegt und der Koordinatenursprung als Bezugspunkt gewählt. Die einzelnen Kräfte werden in F_{kx} und F_{ky} zerlegt.

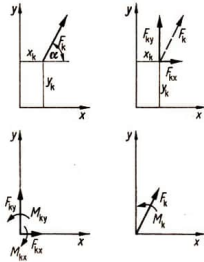


Bild 3.19.
Verschiebung
einer Kraft in
den Koordinatenursprung

Diese Teilkräfte können durch Verschiebung in ihrer Wirkungslinie (ohne Wertänderung) und Parallelverschiebung (plus Versetzungsmoment) in den Koordinatenursprung übertragen werden. Damit wird das allgemeine zu einem zentralen Kraftsystem.

Es gilt

$$R_y = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \sin \alpha_k, \quad R_x = \sum_{k=1}^n F_k \cdot \cos \alpha_k$$

und

$$R = \sqrt{R_y^2 + R_x^2}.$$

Hinzu kommt das Versetzungsmoment

$$M = \sum_{k=1}^n F_{ky} \cdot x_k - F_{kx} \cdot y_k.$$

Um die endgültige Lage der Resultierenden zu bestimmen, muß sie verschoben werden. Die Resultierende hat in bezug auf den Koordinatenursprung das Moment M . Sind x und y die Koordinaten eines Punktes der Resultierenden, so gilt

$$M = R_y \cdot x - R_x \cdot y.$$

Diese lineare Gleichung gibt die Wirkungslinie von R an.

Gleichgewicht. An einem allgemeinen ebenen Kraftsystem herrscht Gleichgewicht, wenn

graphische Lösung:

Krafteck geschlossen und Seileck geschlossen,

rechnerische Lösung:

$$R = 0 \text{ und } M = 0$$

oder

$$R_y = \sum_{k=1}^n F_{ky} = 0, \quad R_x = \sum_{k=1}^n F_{kx} = 0$$

$$M = \sum_{k=1}^n F_{ky} \cdot x_k - F_{kx} \cdot y_k = 0.$$

Es gilt die verkürzte Schreibweise

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M = 0.$$

Tritt der Fall ein, daß $\sum M \neq 0$ und $\sum X = 0$ und $\sum Y = 0$, so ist das Ergebnis ein Kräftepaar. Bei der zeichnerischen Lösung ergibt sich dann, daß das Kräfteck geschlossen und das Seileck offen ist.

Die Gleichgewichtsbedingungen können ersetzt werden durch

$$\sum M_1 = 0; \quad \sum M_2 = 0; \quad \sum M_3 = 0$$

unter der Voraussetzung, daß die Punkte 1, 2 und 3 nicht auf einer Geraden liegen.

Zerlegung. Die Zerlegung einer Kraft in zwei Teilkräfte – gegebenenfalls nach Verschiebung in ihrer Wirkungslinie – wurde auf Seite 76 gelöst.

Sind dagegen die Kraftrichtungen einander parallel, so versagt dieses Verfahren. Hier ist eine Lösung durch die Umkehrung der Addition von Kräften mit Hilfe eines Seilecks möglich.

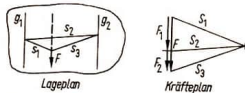


Bild 3.20. Zerlegung einer Kraft in zwei Kräfte paralleler Richtung

Der Lageplan enthält die vorgegebenen Kraftrichtungen. Im Kräfteplan sind die äußeren Polstrahlen S_1 und S_2 durch die Eckpunkte der Kraft F festgelegt. Die Schnitt-



punkte der Seilstrahlen s_1 und s_2 mit den Kraftrichtungen g_1 und g_2 legen den Verlauf des Seilstrahles s_2 fest. Der dazu parallel verlaufende Polstrahl S_2 teilt dann F .

Rechnerisch kann diese Teilung mit Hilfe des Momentensatzes vorgenommen werden. Dabei wird der Bezugspunkt nacheinander auf g_1 und g_2 gewählt.

Weiterhin ist mit Hilfe der Culmannschen Hilfsgeraden eine zeichnerische Zerlegung einer linienflüchtigen Kraft in drei Kraftrichtungen — die sich aber nicht in einem Punkte schneiden dürfen — statisch bestimmt möglich, siehe [1], [2], [8].

Alle anderen Kraftzerlegungen in der Ebene führen nicht zu eindeutigen Ergebnissen.

3.1.1.5. Zentrale räumliche Kraftsysteme

Definition. Mehrere Kräfte, die an einem Punkt angreifen, aber nicht in einer Ebene liegen, bilden ein zentrales räumliches Kraftsystem.

Rechnerische Ermittlung der Resultierenden. In Analogie zum zentralen ebenen Kraftsystem ergibt sich

$$R_x = \sum_{k=1}^n F_{kx}; \quad R_y = \sum_{k=1}^n F_{ky};$$

$$R_z = \sum_{k=1}^n F_{kz}.$$

Die Resultierende ist die Raumdiagonale des Quaders mit den Seiten R_x , R_y und R_z . Sie hat demnach die Größe

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}.$$

Zeichnerische Ermittlung der Resultierenden siehe [4], [9].

Allgemeine räumliche Kraftsysteme siehe [9].

3.1.2. Statik

3.1.2.1. Äußere und innere Kräfte

Vorkommen. Alle auf ein Bauteil (Träger, Lager, Achse, Welle usw.) von außen einwirkenden Kräfte werden als *äußere Kräfte* bezeichnet.

Sämtliche äußeren Kräfte müssen vom Bauteil aufgenommen und auf die Auflager weitergeleitet werden. Dadurch entstehen im Inneren des Bauteiles *innere Kräfte*.

Freimachen. Zur Lösung statischer Aufgaben ist es sinnvoll, das Bauteil aus seiner Umgebung herauszulösen und die wirkenden Kräfte durch Kraftpfeile zu ersetzen. Dabei ist es vorteilhaft, den Körper auf seine neutrale Faser (s. S. 98) zu reduzieren.

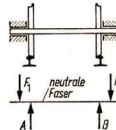


Bild 3.21.
„Freimachen“ einer Eisenbahnachse

Auflager. Bauteile haben in der Ebene drei Freiheitsgrade: Sie können horizontale und vertikale sowie Drehbewegungen ausführen. Je nach ihrer Art können die Auflager ein, zwei oder drei Bewegungsmöglichkeiten ausschalten (Bild 3.22., Seite 81).

Bauteile sind in einem allgemeinen ebenen Kraftsystem statisch bestimmt, wenn den drei Gleichgewichtsbedingungen

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M = 0$$

drei Auflagerkräfte gegenüberstehen.

Belastungen. Die Belastungen können zu Einzellasten oder Streckenlasten vereinfacht werden. Eine Streckenlast ist z. B. das Eigengewicht. Für bestimmte Betrachtungen können die Streckenlasten zu einer resultierenden Einzellast, die in ihrem Schwerpunkt wirkt, zusammengefaßt werden.

Rechnerische Bestimmung der inneren Kräfte. Die unterschiedlichen Belastungen und Konstruktionen bewirken, daß im allgemeinen die inneren Kräfte an den einzelnen Punkten des Bauteils unterschiedlich groß sind. Zur Ermittlung der inneren Kräfte wird ein *Schnitt* durch das Bauteil gelegt.

Durch diesen Schnitt werden die Normal- oder Längskraft N , die Querkraft Q und das Biegemoment M zu äußeren Kräften. N wirkt senkrecht zur Schnittpur, während Q in der Schnittpur liegt. M , N und Q sind die Resultierenden der über die ganze Schnittfläche verteilten inneren Kräfte.

Da auch die einzelnen Abschnitte sich im Gleichgewicht befinden müssen (*Eulersche Schnitthypothese*), können M , N und Q aus



Lagerung	Eingespanntes Auflager (dreiwertig)	Festes Auflager (zweiwertig)	Bewegliches Auflager (einwertig)
Symbol			
Mögliche Bewegung	keine		
Verhinderte Bewegung			
Mögliche Ausführung			
Ansatz im Lageplan			

Bild 3.22./24. Einwertige, zweiwertige und dreiwertige Auflager

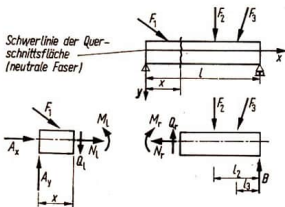


Bild 3.25. Innere Kräfte in einem Träger bei ebener Belastung

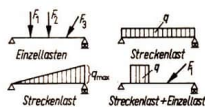


Bild 3.26. Belastungsfälle

den Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden. Hierbei werden M , N und Q als wirkende äußere Kräfte betrachtet. Für das Beispiel nach Bild 3.25. gilt für den rechten Abschnitt:

$$\begin{aligned} \sum X &= 0; & N_r + F_{3x} &= 0; & N_r &= -F_{3x} \\ \sum Y &= 0; & Q_r - F_2 - F_{3y} + B &= 0; \\ & & Q_r &= F_2 + F_{3y} - B \\ \sum M_s &= 0; & -M_r - F_2(l-x-l_2) - & \\ & & -F_{3y}(l-x-l_3) + B(l-x) &= 0 \\ & & M_r &= -F_2(l-x-l_2) - \\ & & -F_{3y}(l-x-l_3) + B(l-x). \end{aligned}$$

In gleicher Weise können M_1 , N_1 und Q_1 aus dem linken Abschnitt errechnet werden. Dabei ergibt sich

$$M_r = -M_1; \quad N_r = -N_1 \quad \text{und} \quad Q_r = -Q_1.$$

Durch weitere Schnitte werden die inneren Kräfte M , N und Q für weitere Werte von x bestimmt. Als Bezugspunkte für $\sum M_s = 0$ wird der Schnittpunkt zwischen Schnittpur und neutraler Faser gewählt.



Die inneren Kräfte werden als positiv angesetzt, wenn sie die in Bild 3.25. angegebenen Richtungen einnehmen.

Um die Verteilung der inneren Kräfte in Abhängigkeit von x zu veranschaulichen, werden die jeweiligen Werte von M , N und Q nach einem Maßstab als Ordinaten aufgetragen. Die dabei entstehenden Flächen werden als Momenten-, Normalkraft- oder Querkraftflächen bezeichnet.

3.1.2.2. Träger auf zwei Stützen

Aufbau. Träger auf zwei Stützen werden im allgemeinen durch ein bewegliches und ein festes Auflager gestützt. Brücken, Achsen und Wellen (zweifach gelagert) werden bei der Berechnung als Träger auf zwei Stützen angesehen. Für die Bemessung ist die Berechnung der Auflagerkräfte und der Momente, mitunter auch der Normalkräfte und der Querkräfte erforderlich.

Berechnung der Auflagerkräfte. Für Träger auf zwei Stützen gelten die Gleichgewichtsbedingungen für allgemeine ebene Kraftsysteme.

$$\sum X = 0; \sum Y = 0; \sum M = 0.$$

Wird ein Träger auf zwei Stützen durch mehrere Einzelkräfte beansprucht, so er-

geben sich z. B. für den Lastfall in Bild 3.27. folgende Auflagerkräfte:

$$\sum M_A = 0, \text{ Drehpunkt im Auflager } A$$

$$B \cdot l - (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3 + F_4 y \cdot l_4 + F_{ny} \cdot l_n) = 0$$

$$B = \frac{1}{l} (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3 + F_4 y \cdot l_4 + F_{ny} \cdot l_n)$$

$$\sum M_B = 0, \text{ Drehpunkt im Auflager } B$$

$$-A_y \cdot l + F_1 (l - l_1) + F_2 (l - l_2) + F_3 (l - l_3) + F_4 y (l - l_4) + F_{ny} (l - l_n) = 0$$

$$A_y = \frac{1}{l} [F_1 (l - l_1) + F_2 (l - l_2) + F_3 (l - l_3) + F_4 y (l - l_4) + F_{ny} (l - l_n)]$$

$$\sum X = 0; A_x - F_{4x} + F_{nx} = 0; A_x = F_{4x} - F_{nx}$$

Probe:

$$\sum Y = 0; A_y + B - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 y + F_{ny}) = 0$$

Normalkräfte. Im Auflager A wirkt die Längskraft A_x . Da die Kräfte F_1 bis F_3 keine x -Komponente haben, ist die Längskraft in gleicher Größe bis zum Angriffspunkt der Kraft F_4 vorhanden. Rechts von der Kraft F_4 wirkt die Längskraft $A_x - F_{4x}$. Die Längskraft wird dann bei F_n Null.

Eine positive Längskraft ist Zug, eine negative Druck.

Querkräfte. Die Querkraft ist in den Auflagern gleich A_y bzw. B , sie vermindert sich im Angriffspunkt einer Einzelkraft um den Betrag der y -Komponente dieser Kraft. Zwischen den Einzelkräften ändert sich der Betrag der Querkraft nicht.

Biegemoment. Das Biegemoment ist im Auflager A Null. Es wächst gleichmäßig bis zum Angriffspunkt der Kraft F_1 .

$$M = A_y \cdot x.$$

Zwischen dem Angriffspunkt von F_1 und F_2 wird

$$M = A_y \cdot x - F_1 (x - l_1).$$

Dabei wird der Drehpunkt jeweils im Schnitt von neutraler Faser und Schnittspur gewählt. In gleicher Weise werden die Biegemomente zwischen den weiteren Kräften ermittelt.

Bild 3.27. zeigt für den angenommenen Lastfall die Normalkraft-, Querkraft- und Momentenflächen.

Das maximale Biegemoment M_{\max} liegt stets an der Stelle, wo die Querkraft ihr Vorzeichen wechselt. Diese Stelle ist der gefährdete Querschnitt, siehe [1], [2], [8], [9].

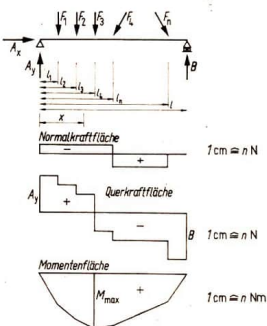


Bild 3.27. Träger auf zwei Stützen mit Einzelkräften

Belastungsfälle.

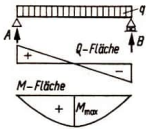


Bild 3.28.
Träger auf zwei Stützen
mit Streckenlast

$$A = B = \frac{q \cdot l}{2};$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8}.$$

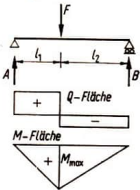


Bild 3.29.
Träger auf zwei Stützen
mit außermittiger Einzelast

$$A = \frac{F \cdot l_2}{l_1 + l_2}; \quad B = \frac{F \cdot l_1}{l_1 + l_2};$$

$$M_{\max} = A \cdot l_1; \quad M_{\max} = \frac{F \cdot l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2}.$$

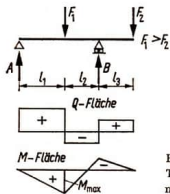


Bild 3.30.
Träger auf zwei Stützen
mit Kragarm

$$A = \frac{F_1 \cdot l_2 - F_2 \cdot l_3}{l_1 + l_2};$$

$$B = \frac{F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2};$$

$$M_{\max} = A \cdot l_1; \quad M_{\max} = \frac{F_1 \cdot l_2 - F_2 \cdot l_3}{l_1 + l_2} \cdot l_1.$$

3.1.2.3. Einseitig eingespannte Träger

Aufbau. Das eine Trägerende ist fest eingespannt, das andere schwebt frei. Einseitig befestigte Zapfen, Stechstifte, Auskragungen von Trägern usw. werden als einseitig eingespannte Träger behandelt.

Berechnung der Auflagerkräfte. Für einseitig eingespannte Träger gelten die Gleichgewichtsbedingungen für allgemeine ebene Kraftsysteme.

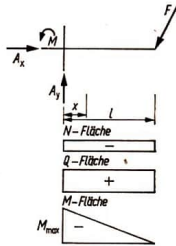


Bild 3.31.
Einseitig eingespannter
Träger mit Einzelast

Für das Beispiel nach Bild 3.31. ergibt sich

$\Sigma M = 0$, gedachter Drehpunkt im Auflager;

$-F_y \cdot l + M = 0; \quad M = +F_y \cdot l;$

$\Sigma X = 0; \quad -F_x + A_x = 0; \quad A_x = +F_x;$

$\Sigma Y = 0; \quad F_y - A_y = 0; \quad A_y = F_y.$

Normalkräfte. Im Auflager wirkt die Normalkraft A_x . Sie bleibt bis zum Angriffspunkt der Einzelkraft bestehen und vermindert sich dort um die x -Komponente dieser Kraft.

Querkräfte. Im Auflager beträgt die Querkraft A_y . Sie verändert ihren Wert bis zum Angriffspunkt der Einzelkraft nicht und vermindert sich dort um die y -Komponente dieser Kraft.

Biegemomente. Das maximale Biegemoment liegt fast immer im Auflager.

Es beträgt unter Beachtung des auf Seite 81 definierten Vorzeichens

$$M_{\max} = -F_y \cdot l.$$



Vom Auflager ab nimmt das Moment ab, es beträgt an der Stelle $x = l$ Null. Treten mehrere Kräfte auf, so weisen die M -Flächen an den Wirkungslinien dieser Kräfte einen Knick und die Q -Flächen einen Sprung auf.

Belastungsfälle.

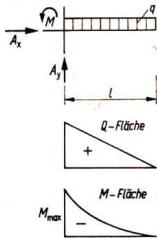


Bild 3.32. Einseitig eingespannter Träger mit Streckenlast

$$A_y = q \cdot l; \quad A_x = 0; \quad M = + \frac{q \cdot l^2}{2};$$

$$M_{\max} = - \frac{q \cdot l^2}{2}.$$

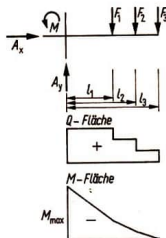


Bild 3.33. Einseitig eingespannter Träger mit mehreren Einzellasten

$$A_y = F_1 + F_2 + F_3; \quad A_x = 0;$$

$$M = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3;$$

$$M_{\max} = - (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3).$$

3.1.2.4. Einfache Fachwerke

Aufbau. Fachwerke bestehen aus mehreren starren Stäben, die zu unverschiebbaren Dreiecken miteinander verbunden sind.

Um seine Funktion als Tragwerk zu erfüllen, muß das Fachwerk starr, d. h. in sich unbeweglich sein. Wenn die Verbindung der einzelnen Stäbe miteinander als Gelenk ausgeführt wird, ist das Dreieck die einzige Figur, die in sich unverschiebbar ist. Alle anderen Figuren verändern sich trotz gleichbleibender Stablänge (Bild 3.35.).

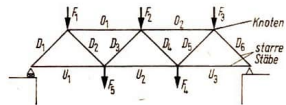


Bild 3.34. Aufbau eines einfachen ebenen Fachwerkes: O Obergurtstab, D Diagonalstab, U Untergurtstab

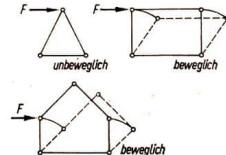


Bild 3.35. Beweglichkeit von Dreieck, Viereck und Fünfeck bei gleichbleibender Kantenlänge

Das einfachste stabile Fachwerk besteht aus einem Dreieck. Weitere Dreiecke müssen so angeschlossen werden, daß jedes folgende mit dem vorhergehenden jeweils nur eine Seite und zwei Eckpunkte gemeinsam hat. Daraus ergibt sich folgende Anzahl von Knoten k und Stäben s :

$$s = 2k - 3.$$

Zur Berechnung der auftretenden Kräfte wird das Fachwerk vereinfacht.

1. Die Knoten verbinden die Stäbe in reibungsfreien Gelenken.
2. Die Stabachsen sind gerade, sie treffen sich im Mittelpunkt des Gelenkes.
3. Die Belastung wirkt nur auf die Knoten.
4. Die Stäbe reichen jeweils nur von Knoten zu Knoten.

Diese Voraussetzungen führen dazu, daß an den Stäben nur Normalkräfte – Druck- oder Zugkräfte – wirken. Diese Normalkräfte wirken in Richtung der Stabachse.



In Wirklichkeit sind die Knoten keine reibungsfreien Gelenke, sondern biegesteife Niet- und Schweißverbindungen. Auch reichen die einzelnen Stäbe oft über mehrere Knoten. Die dadurch entstehenden Nebenspannungen sind im Verhältnis zu den unter diesen Voraussetzungen berechneten Kräften klein und werden vernachlässigt.

Für das ganze Fachwerk wie auch für seine einzelnen Abschnitte gelten die Gleichgewichtsbedingungen.

An jedem Knoten ist $\sum X = 0$; $\sum Y = 0$. Das gesamte Fachwerk liefert also $2k$ Bestimmungsgleichungen. Es sind s Stabkräfte zu ermitteln. Hinzu kommen die drei Auflagerkräfte A_x , A_y und B :

$$s + 3 = 2k.$$

Den $2k$ unbekannten Kräften stehen $2k$ Bestimmungsgleichungen gegenüber. Damit ist das ebene Fachwerk statisch bestimmt, d. h., aus den Gleichgewichtsbedingungen lassen sich alle Stabkräfte *eindeutig* bestimmen.

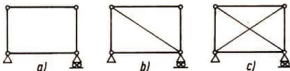


Bild 3.36. Fachwerk: a) $s < 2k - 3$ beweglich; b) $s = 2k - 3$ starr und statisch bestimmt; c) $s > 2k - 3$ starr und statisch unbestimmt

Hat ein Fachwerk $s < 2k - 3$ Stäbe, so ist es beweglich, hat es $s > 2k - 3$ Stäbe, so ist es statisch unbestimmt. Es ist starr, die Stabkräfte können aber nicht eindeutig aus den Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden.

Rechnerische Ermittlung der Stabkräfte. Zuerst müssen die Auflagerkräfte bestimmt werden. Hierzu wird das gesamte Fachwerk als ein Träger auf zwei Stützen betrachtet, an dem die äußeren Kräfte (Belastung und Auflager) wirken.

Zur Berechnung der Stabkräfte wird durch das Fachwerk ein Schnitt gelegt (*Rittersches Schnittverfahren*). Da das ganze Fachwerk

im Gleichgewicht ist, müssen auch einzelne Abschnitte des Fachwerkes im Gleichgewicht sein. Es können also auf den linken oder rechten Abschnitt die Gleichgewichtsbedingungen angewendet werden. An diesem Abschnitt wirken die bekannten Kräfte A_x , A_y und F_1 und die noch unbekannten Kräfte O_2 , D_2 und U_2 .

Der Bezugspunkt wird zweckmäßig so gewählt, daß sich auf ihm zwei der unbekannten Kräfte schneiden. So ergibt sich direkt die dritte Kraft. Für den angenommenen Fall ist r_1 ein Bezugspunkt (*Ritterpunkt*).

$$\begin{aligned} \sum M_{r_1} &= 0; \\ A_x \cdot h_A + U_2 \cdot h_A - A_y \cdot l_A &= 0; \\ U_2 &= \frac{A_y \cdot l_A - A_x \cdot h_A}{h_A}. \end{aligned}$$

In der gleichen Weise wird die Stabkraft O_2 (Bezugspunkt r_2) berechnet. D_2 ergibt sich dann aus $\sum X = 0$.

Es ist auch möglich, einzelne Knoten herauszuschneiden und auf sie die Gleichgewichtsbedingungen $\sum X = 0$ und $\sum Y = 0$ anzuwenden (*Rundschnittverfahren*).

Zeichnerische Ermittlung der Stabkräfte (Cremonaplan). Jeder Knoten muß im Gleichgewicht sein, das bedeutet, daß sein Kräfteplan geschlossen ist. Am Knoten I des Fachwerkes aus Bild 3.38. wirken A_y , O_1 und U_1 . Die bekannte Kraft A_y kann durch zwei Kräfte vorgeschriebener Richtung ins Gleichgewicht gebracht werden (siehe Seite 76). Sind auf diese Weise U_1 und O_1 bestimmt, so können U_2 und V am Knoten II ermittelt werden. In der gleichen Weise werden die Knoten III und IV bearbeitet. Werden diese einzelnen Kräftepläne nacheinander angeordnet, so werden mehrere Kräfte zweimal gezeichnet. Zur Vereinfachung der Zeichenarbeit ist es möglich, *alle Kräfte in einem Plan*, dem *Cremonaplan*, zu vereinigen.

Bei der Ermittlung der Stabkräfte mit Hilfe des *Cremonaplan*s empfiehlt sich folgende Reihenfolge:

1. Das Fachwerk wird maßstabgerecht, nicht zu klein gezeichnet.
2. Die Auflagerkräfte werden rechnerisch oder zeichnerisch bestimmt.

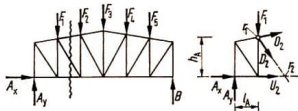
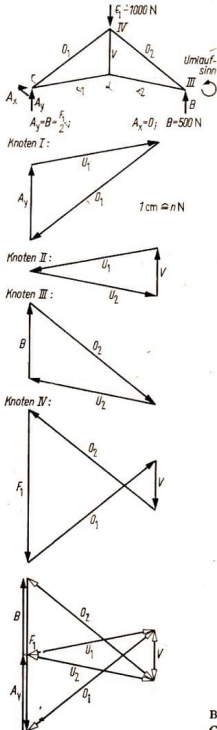


Bild 3.37. Ritterschnitt



- Die einzelnen Stäbe und Knoten werden sinnvoll bezeichnet.
- Neben der Zeichnung des Fachwerkes wird der *Cremonaplan* in einem gewählten Kräftemaßstab begonnen. Zuerst wird das Kräfteck der bekannten äußeren Kräfte A_y , B und F_1 gezeichnet.



$$O_1 = -1070 \text{ N}, U_1 = +850 \text{ N}, V = +330 \text{ N}$$

$$O_2 = 1070 \text{ N}, U_2 = +85 \text{ N}$$

Bild 3.38.
Cremonaplan
O Obergurtstab
U Untergurtstab
V Vertikalstab

Diese Kräfte werden in der Reihenfolge, die aus dem gewählten Umlaufsinn folgt, angeordnet.

- Für einen beliebigen Knoten, an dem mindestens eine Kraft bekannt ist und höchstens zwei Stabkräfte unbekannt sind, wird das Kräfteck vervollständigt. Von hier aus fortschreitend werden die Kräftecke der weiteren Knoten gezeichnet, dabei können jeweils höchstens zwei Stabkräfte unbekannt sein. Die Reihenfolge, in der die Kräfte gezeichnet werden, richtet sich nach dem unter 4. gewählten Umlaufsinn.
- Im *Cremonaplan* werden die einzelnen Längen gemessen, nach dem Kräftemaßstab umgerechnet und die Stabkräfte zu einer Tabelle zusammengestellt.

3.1.2.5. Weitere Tragwerke

In der Technik werden außer diesen grundlegenden Tragwerken noch weitere Tragwerke verwendet.

Gelenk- oder Gerberträger. Ein Träger auf drei oder mehr Stützen ist statisch unbestimmt, da die Gleichgewichtsbedingungen nicht genügend Bestimmungsgleichungen liefern. In dem Gelenk- oder Gerberträger werden außerhalb der Stützen so viele Gelenke angeordnet, wie im jeweiligen Falle Gleichungen fehlen. Für das Gelenk gilt

$$\sum M_g = 0.$$

Für den folgenden Gelenk- oder Gerberträger gelten die Gleichgewichtsbedingungen.

$$\sum X = 0, \sum Y = 0, \sum M = 0, \sum M_g = 0.$$

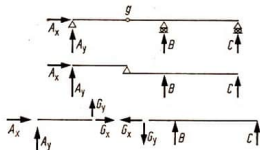


Bild 3.39. Gelenk- oder Gerberträger. Zur Verdeutlichung des Kraftflusses wurde das Gelenk als Auflager gezeichnet



Aus diesen vier Bestimmungsgleichungen können die vier Kräfte A_x , A_y , B und C berechnet werden. Damit ist der Gelenk- oder Gerberträger statisch bestimmt.

Dreigelenkbogen oder Dreigelenkrahmen. Dreigelenkbogen oder Dreigelenkrahmen bestehen aus zwei starren Scheiben, die entsprechend ihrer jeweiligen Konstruktion als Fachwerk oder Vollwandträger ausgebildet sind. Beide Scheiben sind durch ein Scheitelgelenk miteinander verbunden.

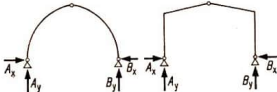


Bild 3.40. Dreigelenkbogen und Dreigelenkrahmen

Für das Scheitelgelenk gilt $\sum M_g = 0$. Damit stehen den vier unbekannten Kräften A_x , A_y , B_x , B_y vier Bestimmungsgleichungen gegenüber. Die Dreigelenkbogen oder Dreigelenkrahmen sind demnach statisch bestimmt.

Zu den Tragwerken: Gelenk- oder Gerberträger, Dreigelenkbogen oder Dreigelenkrahmen und Seil siehe auch [1], [2], [3].

3.1.2.6. Schwerpunkt

Definition. Der Schwerpunkt eines Körpers, einer mit Masse belegten Fläche oder Linie ist der Punkt, in dem die Resultierende aller Teilschwerkräfte dieser Gebilde angreift.

Werden Körper, Flächen oder Linien im Schwerpunkt unterstützt, so befinden sie sich in jeder Lage im Gleichgewicht.

Der Schwerpunkt eines Quaders befindet sich im Schnittpunkt der Raumdiagonalen, der Schwerpunkt eines Rechteckes im Schnittpunkt der Flächendiagonalen und der Schwerpunkt des Dreieckes im Schnittpunkt der Seitenhalbierenden. Bei spiegelsymmetrischen Körpern oder Flächen liegt der Schwerpunkt immer auf der Spiegelebene bzw. Spiegelachse.

Die Lage des Schwerpunktes von Fahrzeugen ist für die Fahrbahnlage (Fahrsicherheit), bei Hebezeugen und Bau-

werken für die Standsicherheit ausschlaggebend. Bei der Blechumformung ist der Flächen- und Linienschwerpunkt von Bedeutung.

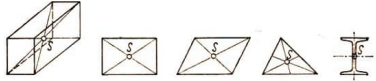


Bild 3.41. Schwerpunkt von Quader, Rechteck, Parallelogramm, Dreieck und Doppel-T-Profil

Rechnerische Schwerpunktbestimmung. Zur Bestimmung der Lage des Schwerpunktes wird die Richtung der Kraft ermittelt, die allen Teilschwerkräften das Gleichgewicht hält (Schwerelinie). Der Körper wird nacheinander im Schwerfeld so gedreht, daß schrittweise die Schwerelinien bestimmt werden können, die parallel zur x -, y - und z -Achse verlaufen. Der Schnittpunkt dieser Schwerelinien ist der Schwerpunkt des Körpers.

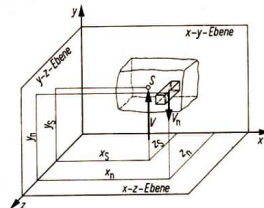


Bild 3.42. Ansatz zur Ermittlung des Schwerpunktes eines Volumens

Ist der Körper aus einem Material, so kann anstelle des Gewichts unmittelbar mit dem Volumen gerechnet werden.

Es handelt sich um allgemeines räumliches Kraftsystem. Beim Gleichgewicht muß $\sum M_z = 0$ (Summe aller Momente, bezogen auf die z -Achse) werden. Wenn x_s , y_s und z_s die Koordinaten des Schwerpunktes sind, ergibt sich

$$\sum M_z = 0;$$

$$x_s \cdot V - (V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 + V_3 \cdot x_3 + \dots + V_n \cdot x_n) = 0.$$

$$x_s = \frac{\sum_{k=1}^n V_k \cdot x_k}{V}.$$



V_k = Volumen eines Teilkörpers

$V = \sum V_k$; Gesamtvolumen

x_k = Abstand der Teilschwerpunkte von der y -Ebene

y_k = Abstand der Teilschwerpunkte von der x -Ebene

z_k = Abstand der Teilschwerpunkte von der x - y -Ebene

Analog gilt für:

$$y_s = \frac{\sum_{k=1}^n V_k \cdot y_k}{V};$$

$$z_s = \frac{\sum_{k=1}^n V_k \cdot z_k}{V}.$$

Bei der Bestimmung des Schwerpunktes einer *Fläche* werden als Vektoren die einzelnen Flächeninhalte angenommen. Es entsteht ein allgemeines ebenes Kraftsystem.

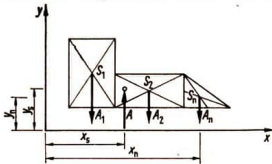


Bild 3.43. Ansatz zur Ermittlung des Schwerpunktes einer Fläche

Bei Gleichgewicht gilt

$\sum M_0 = 0$; Drehpunkt im Koordinatenursprung

$$x_s \cdot A - (A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + \dots + A_n \cdot x_n) = 0;$$

$$x_s = \frac{\sum_{k=1}^n A_k \cdot x_k}{A}.$$

Analog gilt

$$y_s = \frac{\sum_{k=1}^n A_k \cdot y_k}{A}.$$

A_n = Inhalt einer Teilfläche

A = $\sum A_n$; Gesamtfläche

x_k = Abstand der Teilschwerpunkte von der y -Achse

y_k = Abstand der Teilschwerpunkte von der x -Achse

x_s, y_s = Koordinaten des Schwerpunktes.

In gleicher Weise wird der Schwerpunkt einer *Linie* berechnet. Die Vektoren sind in diesem Falle gleich der Länge der einzelnen Strecken. Es ergibt sich ein allgemeines ebenes Kraftsystem.

Bei Gleichgewicht gilt

$\sum M_0 = 0$; Drehpunkt im Koordinatenursprung

$$x_s \cdot l - (l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + \dots + l_n \cdot x_n) = 0;$$

$$x_s = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \cdot x_k}{l}; \quad y = \frac{\sum_{k=1}^n l_k \cdot y_k}{l}.$$

l_k = Länge einer Strecke

l = $\sum l_k$; Gesamtlängende

x_k = Schwerpunktabstand einer Teillinie von der y -Achse

y_k = Schwerpunktabstand einer Teillinie von der x -Achse

x_s, y_s = Koordinaten des Schwerpunktes

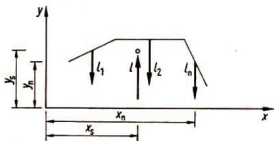


Bild 3.44. Ansatz zur Ermittlung des Schwerpunktes eines Linienzuges

Zeichnerische Schwerpunktbestimmung. Die zeichnerische Bestimmung des Schwerpunktes erfolgt mit Hilfe des Kräfte- und Seilecks (Bild 3.13.), wobei die Größen der einzelnen Teilstücke (Flächen und Linien) als Kräfte aufgefaßt werden, die im Schwerpunkt der Teilstücke angreifen.

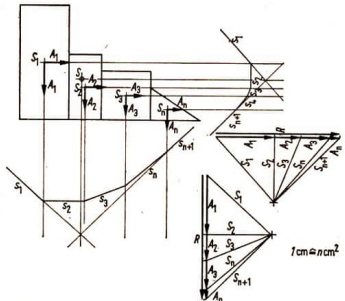
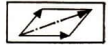


Bild 3.45. Zeichnerische Ermittlung des Schwerpunktes einer Fläche



3.1.2.7. Standsicherheit

Fahrzeuge, Kräne, Stau Mauern usw. werden durch seitlich angreifende Kräfte (Windkräfte, Wasserkräfte und andere Druck- oder Zugkräfte) belastet. Diese Kräfte versuchen die Konstruktion umzukippen. Sie erzeugen ein *Kippmoment*

$$M_k = F \cdot h.$$

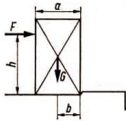


Bild 3.46.
Standmoment und Kippmoment auf festem Untergrund

Diesem Kippmoment wirkt das *Standmoment* M_{st} entgegen. Das Standmoment ist vom Gesamtgewicht der Konstruktion und vom senkrechten Abstand des Schwerpunktes von der Kippkante abhängig:

$$M_{st} = G \cdot b.$$

Das Standmoment muß immer größer als das Kippmoment sein, damit ein stabiles Gleichgewicht vorhanden ist. Die Standsicherheit ν errechnet sich aus M_{st} und M_k :

$$\nu = \frac{M_{st}}{M_k}.$$

Setzt sich eine Konstruktion aus mehreren Teilen zusammen, so sind die Standmomente und Kippmomente zu addieren, und es gilt dann

$$\nu = \frac{\sum M_{st}}{\sum M_k}.$$

3.1.3. Kinematik und Dynamik

Für viele Bewegungsvorgänge genügt es, die Bewegung im Raum und in der Zeit zu erfassen (Kinematik). In der Dynamik werden die Bewegungsvorgänge im Zusammenhang mit den verursachenden Kräften untersucht.

3.1.3.1. Grundbegriffe

Zur eindeutigen Beschreibung einer Bewegung gehören Angaben zur *Bewegungsbahn* (Folge aller Punkte, die während der Bewegung durchlaufen werden):

- geradlinige Bewegung,
- Drehbewegungen,
- Bewegungen auf beliebig gekrümmten Bahnen;

zum *Weg* s (Länge der Bahnkurve);

zur *Zeit* t ;

zur *Geschwindigkeit* v :

- konstante Geschwindigkeit,
- veränderliche Geschwindigkeit;

zur *Geschwindigkeitsänderung* (Beschleunigung a bzw., wenn a negativ ist, Verzögerung):

- gleichmäßig beschleunigte Bewegung,
 - ungleichmäßig beschleunigte Bewegung.
- Bahnänderungen* und *Geschwindigkeitsänderungen* werden durch *Kräfte* erzwungen, die auf den Körper einwirken. Der Bahn- und Geschwindigkeitsänderung wirkt die *Trägheit* der Masse entgegen. Weiterhin tritt unter gewöhnlichen Bedingungen bei allen Bewegungen ein *Reibwiderstand* auf, der der Bewegung entgegengerichtet ist.

Außerdem werden häufig benötigt: *Arbeit*. Die *Arbeit* W_A einer Kraft F längs einer Wegstrecke s ist

$$W_A = F \cdot s \text{ in J.}$$

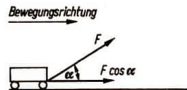


Bild 3.47. Kraftkomponente in Bewegungsrichtung bei der Verrichtung einer Arbeit

Wirkt die Kraft nicht in der Wegrichtung, so wird nur die Kraftkomponente in Wegrichtung wirksam:

$$W_A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$



Leistung. Die Leistung P ist die Arbeit in der Zeiteinheit:

$$P = \frac{W_A}{t} \text{ in W.}$$

Energie. Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Zur *mechanischen* Energie gehören die potentielle Energie W_{pot} und die kinetische Energie W_{kin} .

Die potentielle Energie oder Energie der Lage eines Körpers im Schwerfeld der Erde beträgt

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \text{ in J.}$$

Dabei ist g die Fallbeschleunigung und hat den Wert

$$g \approx 9,81 \text{ ms}^{-2}.$$

Die kinetische Energie oder Wucht eines Körpers bei translatorischen Bewegungen beträgt

$$W_{\text{kin}} = \frac{m v^2}{2} \text{ in J,}$$

dabei ist v die Geschwindigkeit des Schwerpunktes des Körpers.

Einheiten. Es gelten die im Abschnitt 1. *Einheiten und Formelzeichen* definierten Einheiten.

Aus $F = m \cdot a$ resultiert die Einheit der Kraft: das Newton (N)

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kgm s}^{-2}.$$

Das Newton ist die Kraft, die der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m s^{-2} erteilt.

In der Technik wurde bisher vorwiegend die SI-fremde Einheit Kilopond (kp) verwendet. Eine Masse von einem Kilogramm wird mit einer Kraft von 1 kp von der Erde angezogen (Gewicht).

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a; \\ a &= g \approx 9,81 \text{ m s}^{-2}; \quad m = 1 \text{ kg}; \\ F &= 9,81 \text{ kg m s}^{-2}; \\ 1 \text{ kp} &= 9,81 \text{ kg m s}^{-2}. \end{aligned}$$

Demnach ist $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$.

Die Einheit der Energie ist das Joule (J)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}.$$

Als Einheit der Leistung wird das Watt (W) verwendet.

Es gilt

$$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm s}^{-1} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}.$$

Bisher wurde zur Angabe der Leistungen von Kraft- und Arbeitsmaschinen die SI-fremde Einheit Pferdestärke (PS) verwendet:

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ kgm s}^{-1} = 735,5 \text{ W} = 735,5 \text{ Nm s}^{-1}.$$

3.1.3.2. Parallelogramm der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wege

Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wege sind Vektoren, d. h. Größen, die untrennbar mit einer Richtung verbunden sind. Analog zum Parallelogramm der Kräfte (Seite 74) gelten die gleichen Aussagen zum Zusammenfassen und zum Zerlegen für das Parallelogramm der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wege.

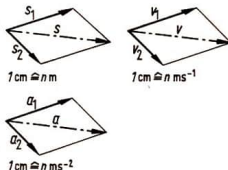


Bild 3.48. Parallelogramm der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wege

3.1.3.3. Diagramme

Im Bahndiagramm wird die Bewegungsbahn dargestellt (Bild 3.49.).

Das Weg-Zeit-Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen dem zurückgelegten Weg s und der Zeit t (Bild 3.50.).

Das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stellt den Zusammenhang der Geschwindigkeit v mit der Zeit t dar; gleichzeitig erscheint der im Zeitabschnitt $t_2 - t_1$ zurückgelegte Weg Δs als Fläche unter der v - t -Kurve (Bild 3.51.).

Das Beschleunigung-Zeit-Diagramm stellt die Veränderung der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit t dar. Gleichzeitig erscheint die im Zeitintervall $t_2 - t_1$ eingetretene Geschwindigkeitszunahme Δv als Fläche unter der a - t -Kurve (Bild 3.52.).

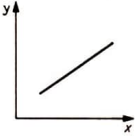


Bild 3.49.
Bahn diagramm einer
geradlinigen Bewegung

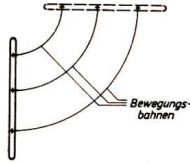


Bild 3.54.
Rotation einer Fläche

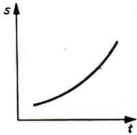


Bild 3.50.
Weg-Zeit-Diagramm

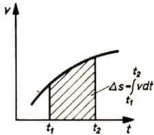


Bild 3.51.
Geschwindigkeit-Zeit-
Diagramm

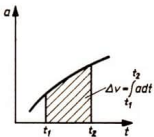


Bild 3.52.
Beschleunigung-Zeit-
Diagramm



Bild 3.53.
Translation
einer Fläche

3.1.3.4. Translation und Rotation

Translation. Translationen oder Verschiebungen bewirken, daß eine Fläche oder ein Körper so bewegt wird, daß alle Punkte kongruente Bewegungsbahnen einnehmen. Bei Translationsbewegungen eines starren Körpers ist es nur notwendig, die Bewegung eines Punktes zu erfassen (Bild 3.53.).

Rotation. Rotationen sind Drehbewegungen um eine Achse. Bei der Rotation eines starren Körpers um eine feste Achse beschreiben alle Punkte Kreisbahnen, die einander ähnlich, aber nicht kongruent sind (Bild 3.54.).

Bei einer Rotation sind für jeden Punkt verschieden:

- der zurückgelegte Weg,
- die Geschwindigkeit und
- die Beschleunigung.

Für alle Punkte *gleiche* Aussagen werden durch folgende Größen erzielt:

- den Drehwinkel φ (in rad oder —)
- die Winkelgeschwindigkeit ω (in rad s⁻¹ oder 1/s)
- die Winkelbeschleunigung ε (in rad s⁻² oder 1/s²)

In der Technik wird außer der Winkelgeschwindigkeit auch die Anzahl der Umdrehungen je Zeiteinheit angegeben.

Die Einheit Radian kann bei allen Angaben entfallen, siehe Seite 9.

Zusammengesetzte Bewegungen. Jede Bewegung eines Körpers oder einer Fläche in einer Ebene kann auf eine Rotation und zwei Translationen zurückgeführt werden (3 Freiheitsgrade).

Vollziehen sich zwei Translationen gleichzeitig, so kann die Gesamtgeschwindigkeit eines Punktes durch das Parallelogramm



der Geschwindigkeiten gewonnen werden (siehe auch Seite 90).

In gleicher Weise können gleichzeitig wirkende Beschleunigungen und zurückgelegte Wege zusammengefaßt werden.

Die Umkehrung dieses Verfahrens gestattet die Zerlegung von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wegen.

Allgemeine krummlinige Bewegungen siehe [1], [8].

3.1.3.5. Bewegungen von Massen

Prinzip von d'Alembert. Mit Hilfe des Grundgesetzes der Mechanik $F = m \cdot a$ können dynamische Vorgänge auf statische Vorgänge zurückgeführt werden. Es gilt auch $F - m \cdot a = 0$.

— $m \cdot a$ wird als Trägheitskraft eines Körpers bezeichnet.

Die Trägheitskraft greift im Schwerpunkt des Körpers an.

Prinzip von d'Alembert: *An jedem Körper sind die äußeren Kräfte und die Trägheitskräfte im Gleichgewicht.*

Geradlinige Bewegung von Massen. Bei einer geradlinigen Bewegung von Massen muß die Resultierende aller äußeren Kräfte durch den Schwerpunkt gehen, da sonst eine Rotation eintritt (Bild 3.55).

Kreisförmige Bewegungen von Massen. Bei Bewegungen auf Kreisbahnen kann die auf die Masse einwirkende Kraft in zwei Komponenten zerlegt werden. Die eine Kraftkomponente F_t beschleunigt die Masse in Richtung der Tangente der Bewegungsbahn und erzielt die Tangentialbeschleunigung a_t . Die zweite Kraftkomponente F_r zeigt zum Mittelpunkt der Bewegungsbahn und ruft die Änderung der Bewegungsrichtung hervor: Beschleunigung in Richtung des Radius a_r .

Jede Masse, die sich auf einer Kreisbahn bewegt, muß also immer — auch bei gleichförmiger Rotation — in Richtung zum Bahnmittelpunkt beschleunigt werden.

Jede Masse hat das Bestreben, sich geradlinig fortzubewegen: Funken an der Schleifscheibe. Die Kraftkomponente F_r zwingt die Masse auf die Kreisbahn.

Beide Kraftkomponenten rufen entsprechende Trägheitskräfte hervor (Bild 3.56.).

Analog zur Masse m bei der geradlinigen Bewegung wird bei kreisförmigen Bewegungen das Massenträgheitsmoment Θ eingeführt.

$$\Theta = \int r^2 dm \quad (\text{in kg m}^2)$$

Die Zusammenstellung der wichtigsten Formeln zum Massenträgheitsmoment, zur Radial- und Tangentialbeschleunigung ist auf Seite 94 aufgeführt.

Die Trägheitskraft $m \cdot a_r$ wird mitunter — nicht korrekt — auch als Fliehkraft bezeichnet.

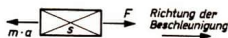


Bild 3.55. Trägheitskraft bei geradliniger Bewegung

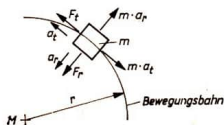


Bild 3.56. Trägheitskräfte bei Bewegungen auf Kreisbahnen



3.1.3.6. Zusammenstellung der wichtigsten Formeln zur Translation und Rotation

Verschiebung (Translation)	Drehung (Rotation)
Weg s in m; km	Winkel φ in rad; —
Geschwindigkeit v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$; $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ $v = \frac{ds}{dt}$	Winkelgeschwindigkeit ω in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$; $\frac{1}{\text{s}}$ $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ $\omega = 2\pi n$
mittlere Geschwindigkeit v_m $v_m = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$	mittlere Winkelgeschwindigkeit ω_m $\omega_m = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}$
Beschleunigung a in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ $a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$	Winkelbeschleunigung ε in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$; $\frac{1}{\text{s}^2}$ $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$
mittlere Beschleunigung a_m $a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$	mittlere Winkelbeschleunigung ε_m $\varepsilon_m = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$
	Umfangsgeschwindigkeit v_u $v_u = \omega \cdot r$
	Tangentialbeschleunigung a_t $a_t = \varepsilon \cdot r$
	Normalbeschleunigung, Radialbeschleunigung a_r $a_r = \omega^2 \cdot r; a_r = \frac{v_u^2}{r}$
	Gesamtbeschleunigung a $a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2} = r \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}$
gleichförmige Bewegung, $a = 0$ $s = s_0 + v \cdot t$	gleichförmige Drehbewegung, $\varepsilon = 0$ $\varphi = \varphi_0 + \omega \cdot t$
gleichförmig beschleunigte Bewegung, $a = \text{konst.}$ $s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} t^2$ $v = v_0 + a \cdot t$	gleichförmig beschleunigte Drehbewegung, $\varepsilon = \text{konst.}$ $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{\varepsilon}{2} t^2$ $\omega = \omega_0 + \varepsilon \cdot t$



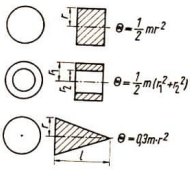
Verschiebung (Translation)	Drehung (Rotation)
Masse m in kg 	Massenträgheitsmoment Θ in kgm^2 $\Theta = \int r^2 dm$ 
Kraft F in N $F = m \cdot a$ Arbeit W_A in J $W_A = F \cdot s$	Moment M in J, Nm $M = \Theta \cdot \varepsilon$ Arbeit W_A in J $W_A = M \cdot \varphi$
Leistung P in W $P = \frac{dW_A}{dt}$; $P = F \cdot v$ mittlere Leistung P_m $P_m = \frac{W_A}{t_2 - t_1}$	Leistung P in W $P = \frac{dW_A}{dt}$; $P = M \cdot \omega$ mittlere Leistung P_m $P_m = \frac{W_A}{t_2 - t_1}$
Trägheitswiderstand F_T $F_T = -m \cdot a$	Trägheitswiderstand M_T $M_T = -\Theta \cdot \varepsilon$
kinetische Energie (Wucht) W_{kin} in J $W_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ potentielle Energie (Lageenergie) W_{pot} in J $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$	kinetische Energie (Drehwucht) W_{kin} in J $W_{\text{kin}} = \frac{\Theta \cdot \omega^2}{2}$

Bild 3.57.
Massenträgheitsmoment von Zylinder, Hohlzylinder und Kegel

3.1.3.7. Reibung

Arten. Jeder Bewegung wirkt ein Reibungswiderstand entgegen. Diese Widerstandskräfte bezeichnet man als *Reibungskräfte*. Je nach der Art des Bewegungszustandes

wird unterschieden zwischen *Haft-* oder *Ruhreibung* und *Gleitreibung*. Je nach der Art der Zwischenschicht wird unterschieden zwischen *Trockenreibung*, *Mischreibung* und *Flüssigkeits- oder Schwimmreibung*.



Bild 3.58. Trockenreibung

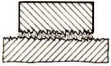


Bild 3.59. Mischreibung



Bild 3.60. Flüssigkeits- oder Schwimmreibung

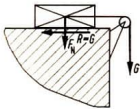


Bild 3.61. Ansatz zur Bestimmung der Reibkraft; der Körper beginnt zu gleiten, wenn $G \geq R_{\max}$ wird

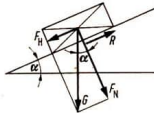


Bild 3.62. Ansatz zur Bestimmung des Reibungswinkels α

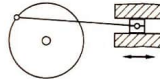


Bild 3.63. Gleitreibung

$$\mu_0 = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha;$$

Der Winkel α wird als Reibungswinkel bezeichnet, sein Tangenswert ist gleich der Reibungszahl μ_0 .

Gleitreibung. Unter Gleitreibung versteht man die Reibung zwischen zwei sich gegeneinander bewegenden Körpern (Bild 3.63.). Gleitreibung auf ebener Fläche. Der Reibungskoeffizient wird bei Gleitreibung auf ebener Fläche mit μ_1 bezeichnet:

$$R = \mu_1 \cdot F_N.$$

Ein Körper auf einer geneigten Ebene setzt sich durch Anheben der Ebene in Bewegung. Ist der Körper erst einmal in Bewegung, dann wird die Ebene etwas „zurückgestellt“ (α wird kleiner), und der Körper gleitet trotzdem weiter abwärts. Die Haft- oder Ruhereibung ist größer als die Gleitreibung.

Reibungszahlen:

Stahl auf Stahl	$\mu_0 = 0,15$	$\mu_1 = 0,05$
Stahl auf Eis	$\mu_0 = 0,027$	$\mu_1 = 0,014$
Holz auf Stein	$\mu_0 = 0,7$	$\mu_1 = 0,3$
Leder auf Metall	$\mu_0 = 0,6$	$\mu_1 = 0,25 \text{ bis } 0,5$

Gleitreibung auf gekrümmten Flächen. Im Gleitlager wirken der Lagerkraft F bzw. A oder B eine Vielzahl verschiedener Normalkräfte F_N entgegen, da die Druckverteilung infolge der gekrümmten Fläche unterschiedlich ist. Diese Normalkräfte erzeugen den Reibungswiderstand

$$\mu_1 \cdot \Sigma F_N > \mu_1 \cdot F,$$

da die $F_{N\alpha}$ -Anteile sich zwar gegenseitig aufheben, der von ihnen erzeugte Reibungswiderstand aber bestehen bleibt. Dies wird bei der Zapfenreibung durch einen besonderen Reibungskoeffizienten μ_1' berücksichtigt. Daraus folgt:

Coulombsches Reibungsgesetz. Die Größe der Reibkraft R ist von der Anpreßkraft F_N und der Reibungszahl μ abhängig. Es gilt

$$R \leq F_N \cdot \mu.$$

R ist der Bewegung entgegengesetzt.

Haft- oder Ruhereibung. Die Haftreibung ist der zwischen zwei Körpern bestehende Widerstand, der überwunden werden muß, um die Körper gegeneinander in Bewegung zu setzen:

$$R = F_N \cdot \mu_0.$$

Die Reibungskraft R ist von der Reibungszahl μ_0 und von der Anpreßkraft F_N abhängig. μ_0 wird experimentell ermittelt, dabei wird der Winkel α bestimmt, bei dem ein Körper auf einer geneigten Ebene zu gleiten beginnt.

Das Gewicht G teilt sich in die Normalkraft F_N und in die Hangabtriebskraft F_H . Zum Beginn des Gleitens ist $F_H = R$. $R = \mu_0 F_N$;

$$F_H = G \cdot \sin \alpha; F_N = G \cdot \cos \alpha$$

in die Gleichung

$$F_H = R = \mu_0 F_N \text{ eingesetzt, ergibt } G \cdot \sin \alpha = G \cdot \cos \alpha \cdot \mu_0;$$



$$\mu_1 \cdot F_N = \mu_1' \cdot F.$$

μ_1' läßt sich auch bei vorhandenem μ_1 nicht berechnen, da die Druckverteilung mathematisch nicht erfaßbar ist. μ_1' wird ebenfalls durch Versuche ermittelt. Das Reibmoment wird dann

$$M_R = \mu_1' \cdot F \cdot \frac{D}{2}.$$

$\mu_1' = 0,006$ bis $0,1$ bei Mischreibung

$\mu_1' = 0,0015$ bis $0,006$ bei Schwimmreibung

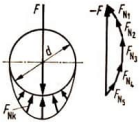


Bild 3.64. Lagerreibung vereinfacht (nach Haeder)

Rollreibung. Rollt ein zylindrischer Körper auf einer ebenen oder gekrümmten Bahn (Rad auf Schiene oder Straße, Rollkörper in Wälzlager), so tritt an den Berührungstellen eine dauernde und elastische Verformung (Abflachung) des Rollkörpers und ein Eindringen der Rollbahn ein (Bild 3.65.). Damit der Rollkörper weiterbewegt werden kann, muß er um den Punkt A gedreht werden. Die erforderliche Zugkraft ist dann:

$$F \cdot f = F_Z \cdot h$$

$$\text{da } h \approx d/2, \text{ wird } F_Z = \frac{2 \cdot F \cdot f}{d}$$

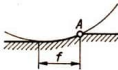
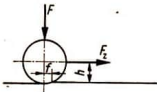


Bild 3.65. Rollreibung bei Drehung um den Punkt A

f = Reibungszahl bei Rollreibung

$f = 0,0005$ bis $0,001$ cm gehärteter Stahl auf gehärtetem Stahl

$f = 0,005$ bis $0,01$ cm Stahl auf Stahl

$f = 1,2$ cm Gummirad auf Wiese [nach Haeder]

Bei einem Fahrzeug setzt sich der **Laufwiderstand** aus dem Rollreibungswiderstand auf der Fahrbahn und aus dem Lagerreibungswiderstand zusammen. Umshlingungsreibung siehe [1], [8], [9].

3.2. Festigkeitslehre

3.2.1. Grundlagen

3.2.1.1. Aufgaben

Die Festigkeitslehre untersucht die Spannungen und Formänderungen, die in *elastischen festen Körpern* unter dem Einfluß von äußeren Kräften auftreten. Ihre Hauptaufgabe ist die zweckmäßige Bemessung von Bauteilen.

3.2.1.2. Beanspruchung und Spannung

Die unterschiedliche Belastung, die verschiedene Befestigung und Gestalt von Bauteilen führt zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Es treten auf:

Zug-, Druck-, Biege-, Torsions- (Verdreh-), Scher- und Knickbeanspruchungen.

Hinzu kommt das Verhalten der Beanspruchung in der Zeit.

Eine *ruhende* Belastung wird aufgebracht und beibehalten. Bei *wechselnder* oder *schwellender* Belastung schwankt die Belastung zwischen einem Maximum und Minimum

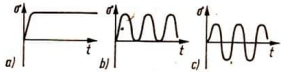


Bild 3.66. Belastung in der Zeit: a) ruhend, b) schwellend und c) wechselnd

Ein Schnitt durch den beanspruchten Körper zeigt die Aufteilung der wirkenden Kräfte auf die Querschnittsfläche. Der Kraftanteil je Flächeneinheit heißt **Spannung**.

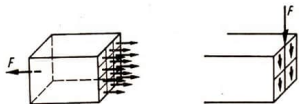


Bild 3.67. Normal- und Tangentialspannungen

Normalspannungen σ wirken senkrecht zur Querschnittsfläche. Sie treten u. a. bei Zug- und Druckbeanspruchungen auf.

Bei mittigen Zug- und Druckbeanspruchungen

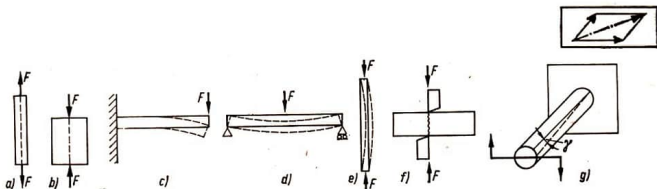


Bild 3.68. Beanspruchungen: a) mittige Zugbeanspruchung; b) mittige Druckbeanspruchung; c) Biegebeanspruchung am einseitig eingespannten Träger, d) Biegebeanspruchung am Träger auf zwei Stützen; e) Knickbeanspruchung, f) Scherbeanspruchung und g) Torsion

gen wird angenommen, daß sich die Kraft über die ganze Querschnittsfläche gleichmäßig verteilt:

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

Tangentialspannungen τ entstehen bei Scher- und Torsionsbeanspruchungen. Hierbei wirken die Kräfte in der Schnittebene. Zur Berechnung der Tangentialspannungen siehe Seite 102.

Spannungen können wie alle Kräfte in Teilkräfte vorgegebener Richtung zerlegt werden.

Wird ein durch Druck oder Zug beanspruchter Träger schräg geschnitten, so wirken in diesem Schnitt auch Tangentialspannungen.

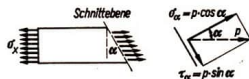


Bild 3.69. Normal- und Tangentialspannungen im schrägen Schnitt bei Zugbeanspruchung

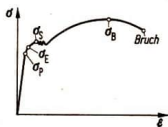


Bild 3.70. Spannung-Dehnungs-Diagramm einer Stahlprobe, σ_p Proportionalitätsgrenze, σ_E Elastizitätsgrenze, σ_S Streckgrenze, σ_B Zugfestigkeit; ausführlich siehe Seite 128

3.2.1.3. Festigkeitsgrenzen

Der Zerreißversuch einer Stahlprobe zeigt das charakteristische Verhalten von Stahl unter bestimmten Spannungen (siehe auch Seite 129).

$$\sigma_z = \frac{F}{A}.$$

Proportionalitätsgrenze. Die Proportionalitätsgrenze σ_p gibt an, bis zu welchem Wert von σ die Dehnung ε direkt proportional der Spannung σ ist.

Elastizitätsgrenze. Die Elastizitätsgrenze σ_E nennt man die Spannung, bis zu der praktisch keine bleibende Dehnung nach Abschwelen der Belastung festzustellen ist.

Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeit σ_B ist die maximale Belastung der Probe, bezogen auf die ursprüngliche Querschnittsfläche A_0 .

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}.$$

Dauerfestigkeit. Die Dauerfestigkeit gibt die Spannung an, die bei einer großen Anzahl von wechselnden Belastungen ertragen wird.

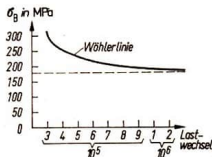


Bild 3.71. Dauerfestigkeit einer Stahlprobe (Wöhlerlinie)



3.2.1.4. Zulässige Spannung und Sicherheit

Zulässige Spannung. Die Spannung darf nur bis zu einem Höchstwert anwachsen, damit keine zu starken Verformungen oder gar der Bruch des Bauteils auftreten. Dieser Höchstwert wird mit σ_{zul} , $\sigma_{d zul}$ usw. bezeichnet und ist tabellarisch festgelegt, siehe [10], Abschnitt „Stahl“.

Sicherheit. Die Sicherheit ν gibt das Verhältnis der tatsächlichen Spannung σ_{max} zu den Festigkeitsgrenzen an. Dabei erreicht die Sicherheit für Stahl im Verhältnis zur Dauerfestigkeit σ_D den Wert

$$\nu_D = \frac{\sigma_D}{\sigma_{max}} = 1,8 \text{ bis } 3$$

und im Verhältnis zur Zugfestigkeit σ_B

$$\nu_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_{max}} = 4 \text{ bis } 6.$$

Bei natürlichen Werkstoffen müssen größere Sicherheiten angenommen werden.

3.2.2. Formänderung und Spannung

3.2.2.1. Dehnung und Spannung

Eine Zugbeanspruchung dehnt das beanspruchte Bauteil. Bis zur Proportionalitätsgrenze ist die Dehnung ϵ proportional der Spannung (Hookesches Gesetz). Die Längenzunahme beträgt Δl :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

Als Proportionalitätsfaktor wirkt der Wert E .

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{oder} \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E}.$$



Bild 3.72. Längenzunahme einer auf Zug beanspruchten Stahlprobe

Der Elastizitätsmodul E ist ein charakteristischer Wert für jeden Werkstoff, z. B.

$$E_{\text{Stahl}} = 210\,000 \text{ MPa};$$

$$E_{\text{Aluminium}} = 70\,000 \text{ MPa}.$$

Die Querschnittsverringering kann im elastischen Bereich vernachlässigt werden. Für Druckbeanspruchung gilt der gleiche Zusammenhang zwischen σ und E .

3.2.2.2. Biegung und Spannung

Spannungsverteilung im Querschnitt. Infolge eines wirkenden Biegemomentes M_z biegt sich z. B. ein Träger auf zwei Stützen nach unten durch (Bild 3.73.). Dabei wird seine obere Zone gestaucht und seine untere Zone gezogen. Bild 3.74. zeigt die Verteilung der auftretenden Normalspannungen. Zwischen beiden Zonen muß eine Übergangszone liegen, die ihre ursprüngliche Länge behält: die *neutrale Faserschicht* oder die *neutrale Faser*. Bild 3.73. zeigt einen Ausschnitt aus dem Träger im Bereich I bis II. In diesem

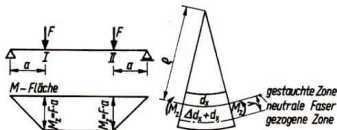


Bild 3.73. Träger auf zwei Stützen und Ausschnitt aus dem Träger im Bereich I bis II

Bereich wirkt nur das konstante Biegemoment M , keine Quer- oder Normalkraft. Der Verlauf der x -, y - und z -Achse entspricht den in Bild 3.74. dargestellten Achsen.

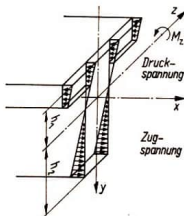


Bild 3.74. Verteilung der Druck- und Zugspannungen in einem durchgebogenen Träger



Für die nachstehenden Herleitungen müssen folgende Voraussetzungen angenommen werden:

1. Die Querschnitte bleiben eben; zur neutralen Faser senkrechte Querschnitte bleiben zu ihr senkrecht.
2. Die Querschnittsabmessungen sind im Verhältnis zur Länge des Trägers klein.
3. Die Kräfte wirken in der Symmetrieebene des Trägers. Aus der Voraussetzung 1 und dem Hookeschen Gesetz folgt, daß die Spannung dem Abstand von der neutralen Faser proportional ist. Für eine Faser im Abstand y von der neutralen Faser, die die Länge dx hat, beträgt die Dehnung

$$\epsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx}.$$

Nach dem Strahlensatz ist

$$\frac{e}{e + y} = \frac{dx}{dx + \Delta dx},$$

daraus folgt

$$\frac{y}{e} = \frac{\Delta dx}{dx} = \epsilon_x.$$

Nach dem Hookeschen Gesetz ist $\sigma = E \cdot \epsilon$; somit

$$\sigma_x = \epsilon_x \cdot E; \quad \sigma_x = \frac{y}{e} \cdot E.$$

Statisches (Flächen-) Moment. Der Träger in Bild 3.73. wurde im Bereich I bis II, wie angenommen, nur durch ein Biegemoment beansprucht. Für die Querschnittsfläche gilt also die Gleichgewichtsbedingung $\sum X = 0$ oder $\int \sigma dA = 0$.

Somit ergibt sich

$$\int \sigma dA = \int \frac{y}{e} \cdot E \cdot dA = 0;$$

$$\frac{E}{e} \int y \cdot dA = 0, \text{ also } \int y \cdot dA = 0.$$

$\int y dA$ wird als das *statische (Flächen-) Moment* in bezug auf die z -Achse bezeichnet. Das Ergebnis des Integrals ist das Ergebnis des Produktes aus der Querschnittsfläche und dem Abstand zum Schwerpunkt. Es wird Null, wenn die z -Achse durch den Schwerpunkt verläuft. Die *neutrale Faser* ist also die Verbindungslinie der Schwerpunkte aller Querschnittsflächen.

Axiales Flächenträgheitsmoment. Weiterhin gilt für die Querschnittsfläche $\sum M = M_z$.

$$M_z = \int \sigma_x \cdot y \cdot dA = 0,$$

es folgt

$$M_z = \int \frac{y}{e} E \cdot y \cdot dA$$

$$M_z = \frac{E}{e} \int y^2 \cdot dA.$$

$J_z = \int y^2 \cdot dA$ ist das *axiale oder äquatoriale (Flächen-) Trägheitsmoment*, bezogen auf die z -Achse, die in dem angenommenen Beispiel durch den Schwerpunkt geht.

Widerstandsmoment. Unter Berücksichtigung des axialen (Flächen-) Trägheitsmomentes ergeben sich folgende Spannungen:

$$M_z = \frac{E}{e} J_z$$

und weiter

$$M_z = \frac{\sigma_x}{y} J_z$$

oder

$$\sigma_x = \frac{M_z}{J_z} y.$$

Am äußeren Rand des Trägers sind die größten Spannungen.

$$\text{Oberkante: } \sigma_x = - \frac{M_z}{J_z} h_1$$

$$\text{Unterkante: } \sigma_x = \frac{M_z}{J_z} h_2, \text{ wobei } h_1 \text{ bzw. } h_2 \text{ der}$$

Abstand des oberen bzw. unteren Randes der Querschnittsfläche vom Schwerpunkt ist.

$W_{zo} = \frac{J_z}{h_1}$ wird als das *axiale Widerstandsmoment*, bezogen auf die Oberkante, und

$W_{zu} = \frac{J_z}{h_2}$ als das *axiale Widerstandsmoment*, bezogen auf die Unterkante, bezeichnet.

Damit wird an der Oberkante

$$\sigma_x = - \frac{M_z}{W_{zo}}$$

und an der Unterkante

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_{zu}}.$$

Satz von Steiner. Bei zusammengesetzten Querschnitten befindet sich die neutrale Faser im Schwerpunkt der Gesamtfläche.

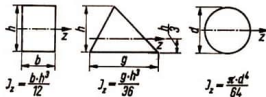


Bild 3.75. Axiales Flächenträgheitsmoment von Rechteck, Dreieck und Kreis

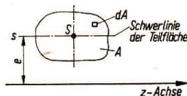


Bild 3.76. Ansatz zum Satz von Steiner

In diesem Falle wird das axiale Trägheitsmoment der Teilfläche, deren Schwerpunkt vom Gesamtschwerpunkt die Entfernung e hat,

$$J_z = \int (y + e)^2 dA = \int y^2 \cdot dA + \int 2 \cdot e \cdot y \cdot dA + \int e^2 dA.$$

$\int y^2 \cdot dA = J_s$ (axiales [Flächen-] Trägheitsmoment, auf die Schwerachse der Teilfläche bezogen)

$2e \int y dA = 0$ (statisches Moment, auf die Schwerachsen bezogen, ist Null)

$$e^2 \int dA = e^2 A.$$

Daraus folgt

$$J_z = J_s + e^2 A \text{ (Steinerscher Satz).}$$

Berechnung des axialen Flächenträgheitsmomentes. Die (Flächen-) Trägheitsmomente für Regelquerschnitte sind in Tabellen zusammengefaßt, z. B. [4]. Für den in Bild 3.77. angenommenen Querschnitt ergibt sich folgender Rechengang:

1. Berechnung der Lage des Schwerpunktes aller Flächen.

$$A \cdot y_s = A_1 \frac{h_1}{2} + A_2 \left(-\frac{h_2}{2} \right);$$

$$y_s = \frac{A_1 \cdot \frac{h_1}{2} - A_2 \cdot \frac{h_2}{2}}{A}.$$

$x_s = 0$, da die Schwerpunkte von A_1 und A_2 in diesem Falle auf der gemeinsamen Symmetrieachse liegen.

2. Berechnung der axialen (Flächen-) Trägheitsmomente J_{z1} und J_{z2} , bezogen auf die Schwerachsen z_{s1} und z_{s2} der Flächen A_1 und A_2 .

A_1 und A_2 sind Rechtecke, also gilt

$$J_{z_{s1}} = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12};$$

$$J_{z_{s2}} = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12}.$$

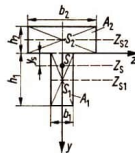


Bild 3.77. Zusammengesetzter Querschnitt

3. Berechnung des gemeinsamen Trägheitsmomentes, bezogen auf die Schwerachse z_s .

$$J_{zs} = J_{zs1} + A_1 \left(\frac{h_1}{2} - y_s \right)^2 + J_{zs2} + A_2 \left(\frac{h_2}{2} + y_s \right)^2.$$

In der gleichen Weise kann J_y , also das axiale (Flächen-) Trägheitsmoment, bezogen auf die y -Achse, berechnet werden.

3.2.2.3. Zugbeanspruchung

Wird ein Bauteil (Zugstange, Kettenglied, Anhängerkupplung, Drahtseil usw.) mit der Kraft F auf Zug beansprucht und nehmen alle Flächenteilen dieser Querschnittsflächen gleichmäßig an der Kraftübertragung teil, so ist die Normalspannung

$$\sigma_z = \frac{F}{A}.$$

Diese Aussage gilt nur für *mittige* Beanspruchung.

Die zulässige Zugfestigkeit σ_{zul} ist aus Tabellen zu entnehmen; die erforderliche Querschnittsfläche errechnet sich dann aus

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \leq \sigma_{zul}; \quad A \geq \frac{F}{\sigma_{zul}}.$$

Die Längenzunahme beträgt im elastischen Bereich

$$\Delta l = \frac{\sigma_z \cdot l}{E}.$$

3.2.2.4. Druckbeanspruchung und Flächenpressung

Druckbeanspruchung. Wird ein Bauteil (Fundament, Maschinengestell, Pfeiler, Säule usw.) mit der Kraft F *mittig* auf Druck beansprucht und nehmen alle Flächenteilen dieser Querschnittsflächen gleichmäßig an der Kraftübertragung teil, so wird die Normalspannung



$$\sigma_d = \frac{F}{A}$$

Die zulässige Druckfestigkeit $\sigma_{d \text{ zul}}$ ist aus Tabellen zu entnehmen. Die erforderliche Querschnittsfläche errechnet sich dann aus

$$\sigma_d = \frac{F}{A} \leq \sigma_{d \text{ zul}}; \quad A \geq \frac{F}{\sigma_{d \text{ zul}}}$$

Bauteile, die nach dieser Formel berechnet werden, müssen im Verhältnis zum Querschnitt sehr kurz sein, damit ein Ausknicken nicht möglich ist (Ausknicken – siehe Knickbeanspruchung). Die Druckspannung wird mit einem negativen Vorzeichen versehen.

Flächenpressung. Die Flächenpressung ist mit der Druckbeanspruchung vergleichbar, es ist eine Druckbeanspruchung an der Berührungsfläche zweier verschiedener Bauteile. Für die Ermittlung der Flächenpressung zwischen ebenen Bauteilen werden die auftretende Kraft F und die Berührungsfläche herangezogen.

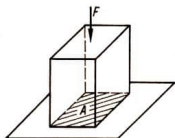


Bild 3.78. Flächenpressung

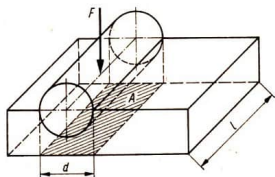


Bild 3.79. Lochleibungsdruck

Die Flächenpressung p ist

$$p = \frac{F}{A}$$

Bei gekrümmten Berührungsflächen (Bohrungswand für Schrauben, Bolzen, Niete, Stifte) ist die projizierte Fläche einzusetzen:

$$A = d \cdot l$$

Die Flächenpressung wird hierbei als Lochleibungsdruck bezeichnet.

3.2.2.5. Knickbeanspruchung

Werden Bauteile, die im Verhältnis zum Querschnitt sehr lang sind (Kurbelstangen, Rüst- und Stützstangen, Bohrspindeln usw.), durch eine Druckkraft beansprucht, so knicken diese Bauteile seitlich in Richtung des kleinsten axialen Flächenträgheitsmomentes aus, wenn die Kraft F einen zu hohen Wert annimmt. Der Stab knickt auch dann aus, wenn der Stab genau mittig beansprucht wird. Die Kraft, die ein Ausknicken dieser Teile hervorruft, ist die **Knickkraft** F_k . Daraus errechnet sich die **Knickspannung** σ_k :

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}$$

Je nach der Konstruktion und dem Material erfolgt das Ausknicken bei unterschiedlichen Knicklasten F_k .

Die Sicherheit gegen Knickung beträgt

$$v = \frac{F_k}{F_{\text{vorh}}}$$

Für die Knickung eines Stabes ist sein Schlankheitsgrad ausschlaggebend. Der Schlankheitsgrad λ ist definiert als

$$\lambda = \frac{l_k}{\sqrt{\frac{J}{A}}}$$

l_k = Knicklänge (Bild 3.80.)
 J = minimales axiales Flächenträgheitsmoment
 A = Querschnittsfläche

In TGL 13 503, Blatt 1, ist die Berechnung für Bauteile aus Stahl festgelegt.

Im allgemeinen sollte der Schlankheitsgrad $\lambda = 150$ nicht überschritten werden; für $\lambda < 20$ braucht die Knickfestigkeit nicht nachgewiesen zu werden. Der Spannungs-



Stabende 1 Stabende 2	beweglich eingespannt	drehbar drehbar	drehbar eingespannt	eingespannt eingespannt
Knicklast	$F_k = \frac{\pi^2 E J}{4 l^2}$	$F_k = \frac{\pi^2 E J}{l^2}$	$F_k = \frac{2 \pi^2 E J}{l^2}$	$F_k = \frac{4 \pi^2 E J}{l^2}$
Knicklänge	$l_k = 2l$	$l_k = l$	$l_k = 0,71 l$	$l_k = 0,5 l$

Bild 3.80. Einspannung von Stützen; Knicklängen und Knicklasten nach Euler

nachweis wird zurückgeführt auf den Spannungsnachweis bei Druck (siehe 3.2.2.4.). Dabei wird die zulässige Druckspannung $\sigma_d \text{ zul}$ durch den Faktor ω abgemindert

$$\sigma_k \text{ zul} = \frac{\sigma_d \text{ zul}}{\omega}$$

Im Bereich von $\lambda = 20 \dots 150$ schwankt ω zwischen 1,01 und 7,32 je nach Verwendungszweck des Bauteils, nach dem Material und nach Anordnung der Schweißnähte.

Für Stäbe aus St 38 ohne Längsschweißnähte gelten z. B. folgende Werte:

λ	20	40	60	80	100	150
ω	1,01	1,05	1,16	1,39	1,81	3,47

3.2.2.6. Gerade Biegebeanspruchung

Kräfte, die ein Bauteil (Achsen, Bolzen, Träger) so belasten, daß ein Biegemoment M_b auftritt, rufen eine Biegespannung hervor (siehe Seite 98 ff.):

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

σ_b muß mit der zulässigen Biegespannung $\sigma_b \text{ zul}$ verglichen werden. Die maximale Spannung darf einen zulässigen Wert nicht übersteigen:

$$\sigma_b \text{ vorh} \leq \sigma_b \text{ zul}$$

Die maximale Spannung tritt dort auf, wo das Biegemoment am größten und das Widerstandsmoment am kleinsten ist.

Berechnung des Widerstandsmomentes siehe Seite 99.

Das für die Belastung erforderliche Widerstandsmoment W_b errechnet sich aus

$$W_b \geq \frac{M_b}{\sigma_b \text{ zul}} \quad (\text{in cm}^3).$$

Der entsprechende Querschnitt wird einer Tabelle entnommen.

Beispiel siehe Maschinenlehre, Seite 175.

3.2.2.7. Scherbeanspruchung

Werden Bauteile (Bolzen, Schrauben, Stifte, Niete usw.) senkrecht zur Längsachse beansprucht, so rufen diese Kräfte *Scher-spannungen* hervor, die mit τ_a bezeichnet werden:

$$\tau_a = \frac{F}{A}; \quad F \text{ zul} \leq A \cdot \tau_a \text{ zul}$$

Bei der Berechnung ist die Anzahl der Scherflächen zu beachten.

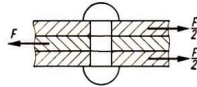


Bild 3.81. Nietverbindung mit zwei Scherflächen

3.2.2.8. Verdreh- oder Torsionsbeanspruchung

Alle Bauteile, die Drehmomente übertragen (Wellen), werden auf Verdrehung (Torsion) beansprucht. Das Torsionsmoment M_t ruft im Querschnitt die Torsionsspannung τ_t hervor:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t}; \quad W_t \geq \frac{M_t}{\tau_t \text{ zul}}$$

W_t ist das Widerstandsmoment gegen Torsion.

$\tau_t \text{ zul}$ ist Tabellen zu entnehmen.

Berechnung von W_t siehe [1].

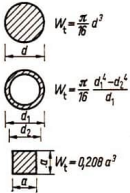


Bild 3.82.
Widerstandsmoment gegen Torsion von Kreis, Kreisring und Quadrat

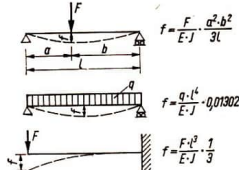


Bild 3.83. Maximale Durchbiegung

3.2.2.9. Zusammengesetzte Beanspruchung

Gleichartige Spannungen. In der Praxis werden die Bauteile oft so beansprucht, daß gleichzeitig unterschiedliche Spannungen entstehen. Hierbei können gleichartige Spannungen unmittelbar addiert werden:

Normalspannungen,

Zugspannungen und Biegespannungen, z. B. bei außermittigem Zug;

Druckspannungen und Biegespannungen, z. B. bei außermittigem Druck;

Tangentialspannungen,

Torsionsspannungen und Schubspannungen.

Ungleichartige Spannungen. Ungleichartige Spannungen können nicht unmittelbar zusammengefaßt werden. Sie müssen nach Festigkeitshypothesen durch Vergleichsspannungen ersetzt werden. Das gilt insbesondere für Torsionsspannungen und Biegespannungen, z. B. bei einer Welle mit einem Zahnrad.

Zu den Festigkeitshypothesen nach *Bach*, *Mohr* und der Hypothese der größten Gestaltsänderungsenergie siehe [1].

3.2.2.10. Biegelinie

Für einige Bauteile (Turbinaläufer, Wellen für Elektromotoren) ist ihre Verformung infolge der wirkenden Kräfte von Bedeutung.

Aus dem Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Verformung (Abschnitt 3.2.2.2.) kann mit Hilfe der höheren Mathematik die Differentialgleichung der elastischen Biegelinie ermittelt werden:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{M}{E J};$$

Zur Herleitung und Auflösung dieser Gleichung siehe [1], [2], [9].

Aus dieser Gleichung ergeben sich bei folgenden Belastungsfällen die Durchbiegungen f :

3.3. Weiterführende Literatur

- [1] Das Grundwissen des Ingenieurs.
VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [2] F. Bochmann:
Statik im Bauwesen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [3] Autorenkollektiv:
Technische Mechanik.
VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [4] Kirst:
Werkstatttabellen.
VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [5] Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau.
Band I,
Springer Verlag.
- [6] A. Recknagel:
Physik — Mechanik.
VEB Verlag Technik, Berlin.
- [7] E. Menge, E. Zimmermann und E. Schrieder:
Mechanik — Aufgaben aus der Maschinentechnik.
VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1963.
- [8] H. Heyde:
Mechanik für Ingenieure.
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- [9] D. Rüdiger, A. Kneschke:
Technische Mechanik.
Band 1: Statik starrer Körper
Band 2: Festigkeitslehre
Band 3: Kinematik und Kinetik
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- [10] H. Förschmann:
Bautechnische Berechnungstabellen für Ingenieure.
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1975.

4. Technische Wärmelehre (Grundlagen)

verfaßt von Doz. Dr.-Ing. H. Hofmann

Verwendete Formelzeichen

A	Absorptionszahl
A	Fläche
A_w	wärmeübertragende Fläche
c	spezifische Wärme
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen
D	Durchlaßzahl
E	Strahlungsenergie
G	Menge eines Gases
H, h	Enthalpie
W_A	mechanische Arbeit
p	Druck
p_0	Druck bei 0 °C
Q	Wärmeenergie
\mathcal{R}	universelle Gaskonstante
R	spezielle Gaskonstante
R	Reflektionszahl
S	Entropie
t	Temperatur in Grad Celsius (°C)
t_M	mittlere Temperatur des strömenden Stoffes
T	Temperatur in Grad Kelvin (K)
U	innere Energie
V	Volumen
V_0	Volumen bei 0 °C
v	spezifisches Volumen
V_M	Molvolumen
α	Ausdehnungskoeffizient
α	Spannungskoeffizient
α_w	Wärmeübergangszahl
λ	Wärmeleitfähigkeit

4.1. Vorbemerkungen

Obwohl schon im klassischen Altertum versucht wurde, das Wesen der Wärme zu deuten, konnten aber erst etwa vom 18. Jahrhundert an, besonders aber im 19. Jahrhundert, beweiskräftige Aussagen auf diesem Gebiet gemacht werden. Bis zu dieser Zeit standen besonders zwei Theorien im Vordergrund der Betrachtungen. Mit der einen Theorie wurde die Auffassung vertreten, daß Wärme ein übertragbarer Stoff mit schwererer Masse sei. (Ähnlich der alten aristotelischen Phlogistonlehre.) Diese Annahme wurde von der Tatsache abgeleitet, daß zwei Körper unterschiedlicher Temperatur bei gegenseitiger Berührung sich auf eine Mitteltemperatur einstellen, d. h., der kältere Körper wird wärmer und der wärmere kälter. Die Theorie von der stofflichen Eigenschaft der Wärme versagte aber sofort, wenn man z. B. die Änderung der Aggregatzustände durch Wärmeeinfluß betrachtet.

Die zweite Theorie deutete das Wesen der Wärme als unsichtbare schnell bewegte Teilchen der Atome. Begründet wurde diese Ansicht durch die Erwärmung von Körpern bei gegenseitiger Reibung.

Mit den Erkenntnissen von *Robert Mayer* (1840) und *Joule* (1843) wurde dann eindeutig bewiesen, daß Wärme eine besondere Form der Energie ist (Bewegungsenergie der Moleküle). Diese Aussage ließ nun den Schluß zu, Wärme von anderen Energieformen abzuleiten bzw. in andere Energieformen überzuführen und sie auch in mechanische Arbeit umformen zu können. Die letztgenannte Schlußfolgerung, nämlich Umformung der Wärme in mechanische Arbeit und umgekehrt, eröffnete besonders der technischen Entwicklung große Perspektiven. Auf dieser Erkenntnis aufbauend, entstanden die theoretischen Grundlagen der Dampfmaschinen, Verbrennungsmotoren, Dampf- und Gasturbinen sowie von Einrichtungen der Kälteerzeugung und vielen anderen technischen Anlagen. Mit der Nutzung der Wärme für die Technik wurde es notwendig, die Gesetzmäßigkeiten der Wärme, speziell auch von den spezifischen Belangen der Technik aus, zu untersuchen. Mit der Lösung dieser Aufgabe beschäftigt sich die *Technische Wärmelehre*. Das Gebiet der Technischen Wärmelehre ist sehr umfangreich. Wichtige Teilgebiete sind die Thermodynamik und die Wärmeübertragung. Während die *Thermodynamik* sich mit den durch Wärmeenergie hervorgerufenen Bewegungsvorgängen befaßt, werden im Bereich der *Wärmeübertragung* verschiedene Erscheinungen der Übertragung von Wärmeenergie untersucht (z. B. Wärmeleitung, Wärmeübertragung durch Strahlung u. a.).

4.2. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (1. Form)

Zwischen Arbeit und Energie besteht ein enger Zusammenhang. Beide haben die gleichen Einheiten: J, Nm.

Allein aus der Zahl und der Einheit kann nicht entnommen werden, ob es sich um Energie oder Arbeit handelt. Der begriffliche Unterschied besteht darin, daß die Energie das Arbeitsvermögen und Arbeit die Nutzung der Energie ausdrückt.

Für die Wärmeenergie Q wurde bisher vorwiegend die SI-fremde Einheit Kalorie (cal) verwendet. 1 cal ist die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 g Wasser von $14,5^\circ\text{C}$ auf $15,5^\circ\text{C}$ zu erwärmen. Betrachtet man die Definition der Wärme nach *Clausius*, wonach Wärme Bewegungsenergie der Moleküle ist, so zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen Wärmeenergie und mechanischer Energie. Die quantitative Beziehung zwischen Wärmeenergie und mechanischer Energie wird, nach den Erkenntnissen von *Robert Mayer*, im mechanischen Wärmeäquivalent ausgedrückt.

Dieses besagt, daß die Wärmeenergie von 1 kcal der mechanischen Energie von 426,79 kpm bzw. 4186,8 Nm gleichwertig ist ($1 \text{ kcal} = 426,79 \text{ kpm} = 4186,8 \text{ Nm}$).

Mit der weiteren schrittweisen Einführung des Internationalen Einheitensystems (SI) wird als Einheit für die Wärmeenergie das Joule (J) verwendet (siehe Abschnitt 1. Einheiten und Formelzeichen). Ein Joule ist die Wärmemenge, die der mechanischen Arbeit von einem Newtonmeter bzw. einer Wattsekunde äquivalent ist ($1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$). Daraus ergibt sich $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J} = 4,1868 \text{ Nm}$.

Aus den bisherigen Betrachtungen läßt sich folgende Aussage formulieren:

Bei Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit und umgekehrt bleibt die Summe der beteiligten Energien konstant.

Diese Aussage läßt sich auf alle Energieumwandlungen übertragen, also verallgemeinern, und stellt die erste Form des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre dar. Er

besagt, daß Energie weder erzeugt werden noch verlorengehen kann. In diesem wichtigen Satz sind sowohl das Äquivalenzprinzip als auch das Energieprinzip enthalten.

4.3. Die thermischen Zustandsgrößen und ihre Beziehungen zueinander

4.3.1. Die thermischen Zustandsgrößen

Aus der Definition der Wärme läßt sich der Schluß ziehen, daß zur Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit besonders die Stoffe geeignet sind, deren Moleküle leicht bewegt werden können. Diese Bedingung erfüllen in erster Linie die Gase und Dämpfe.

Die Ausdehnung eines Gases, durch die Arbeit verrichtet wird, ist im Gegensatz zur Ausdehnung fester Körper nicht nur vom Stoff und der Temperatur, sondern auch vom Druck abhängig. Bei Vorgängen in Gasen und Dämpfen sind somit die drei Zustandsgrößen Volumen, Druck und Temperatur zu beachten. Diese Größen, auch *thermische Zustandsgrößen* genannt, stehen in gesetzmäßiger Beziehung zueinander.

4.3.2. Die isotherme Zustandsgleichung

So fanden *Robert Boyle* und *Edme Mariotte*, daß bei gleicher Temperatur das Produkt

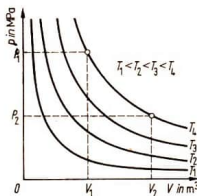


Bild 4.1. Gesetz von Boyle-Mariotte: $p \cdot V = \text{konst.}$

aus Druck p und Volumen V einer Gasmenge unverändert bleibt:

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

Diese Beziehung bezeichnet man als *Gesetz von Boyle-Mariotte* oder als *isotherme Zustandsgleichung*. Sie stellt für jede Temperatur im p - V -Schaubild eine gleichseitige Hyperbel dar (Bild 4.1.).

4.3.3. Die isobare Zustandsgleichung

Joseph Louis Gay-Lussac untersuchte die Vorgänge in Gasen bei Temperaturveränderungen. Dabei stellte er fest, daß sich die Gase bei konstant gehaltenem Druck je Grad Temperaturerhöhung um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens bei 0 °C ausdehnen:

$$V = V_0 + V_0 \cdot \alpha \cdot t = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t).$$

V = Volumen bei t °C

V_0 = Volumen bei 0 °C

$$\alpha = \text{Ausdehnungskoeffizient} = \frac{1}{273}$$

Diese Beziehung ist als *erstes Gesetz von Gay-Lussac* oder als *isobare Zustandsgleichung* bekannt (Bild 4.2.).

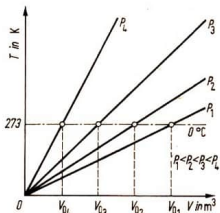


Bild 4.2. Erstes Gesetz von Gay-Lussac:

$$V = V_0 (1 + \alpha \cdot t)$$

4.3.4. Die isochore Zustandsgleichung

Ein ähnliches Ergebnis erhält man, wenn das Volumen konstant gehalten wird. Bei dieser Bedingung gilt, daß ein Gas von konstantem Volumen bei 1 K Temperaturände-

rung seinen Druck um $\frac{1}{273}$ des Druckes ändert, den es bei 0 °C besitzt.

$$p = p_0 + p_0 \cdot \alpha \cdot t = p_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

p = Druck bei t °C

p_0 = Druck bei 0 °C

$$\alpha = \text{Spannungskoeffizient} = \frac{1}{273}$$

Diese Beziehung ist das *zweite Gesetz von Gay-Lussac* oder die *isochore Zustandsgleichung* (Bild 4.3.).

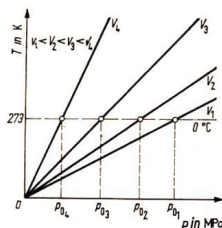


Bild 4.3. Zweites Gesetz von Gay-Lussac:

$$p = p_0 (1 + \alpha \cdot t)$$

4.3.5. Die Zustandsgleichung der idealen Gase

Wird keine von den drei Zustandsgrößen konstant gehalten, so erhält man

$$p \cdot V = p_0 \cdot V_0 (1 + \alpha \cdot t).$$

Wird für t (in °C) die absolute Temperatur $t + 273 = T$ (in K) gesetzt, vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0},$$

oder wenn man das spezifische Volumen¹ v einführt:

$$\frac{p \cdot v}{T} = \frac{p_0 \cdot v_0}{T}.$$

¹ Das spezifische Volumen ist das Volumen, bezogen auf die Masseneinheit, d. h. auf die Masse von 1 kg.

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Masse}} = v \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Diese Form wird allgemein die *Zustandsgleichung der idealen Gase* genannt.

Sie sagt aus, daß bei jedem Gas in einem beliebigen Zustand $\frac{p \cdot v}{T}$ konstant ist. Der

Ausdruck $\frac{p \cdot v}{T}$ kann durch die Größe R (spezielle Gaskonstante) ersetzt werden.

Ihre Einheit ist $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, denn sie setzt sich aus Druck $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, Volumen je Masseneinheit $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ und Temperaturdifferenz K zusammen.

Die spezielle Gaskonstante ist demnach eine Arbeit je Kilogramm Menge und je Kelvin Temperaturunterschied. Ihre Größe ist für jedes Gas verschieden (z. B. Sauerstoff = 259,9; Wasserstoff = 4126,1; Luft = 287,0; Wasserdampf = 461,5).

4.3.6. Die allgemeine thermische Zustandsgleichung

Wird in der Gleichung $\frac{p \cdot v}{T} = \text{konst.}$ die Größe R eingesetzt, erhält man die *allgemeine thermische Zustandsgleichung*:

$$\frac{p \cdot v}{T} = R;$$

$$p \cdot v = R \cdot T.$$

Bei einem Volumen einer beliebigen Gasmenge G in kg gilt entsprechend

$$p \cdot \frac{V}{G} = R \cdot T$$

oder

$$p \cdot V = G \cdot R \cdot T.$$

Wählt man das Volumen von 1 kmol, d. i. eine Gasmenge von M Kilogramm, wenn M das Molekulargewicht ausdrückt, dann spricht man vom Molvolumen V_M . Unter Normalbedingungen, d. h. bei 0°C und 101,3 kPa (760 Torr), ist V_M für alle Gase $22,4 \text{ m}^3$.

Durch Einsetzen von V_M erhält dann die allgemeine Zustandsgleichung die Form

$$p \cdot V_M = M \cdot R \cdot T.$$

Da V_M eine von der Gasart unabhängige konstante Größe ist, muß auch der Ausdruck $M \cdot R$ konstant sein. Für ihn läßt

sich ein neuer Begriff, die *universelle Gaskonstante* \mathfrak{R} , einführen.

Es gilt also $M \cdot R = \mathfrak{R}$

$$\mathfrak{R} = 8,3143 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}.$$

Durch Einsetzen von \mathfrak{R} in die allgemeine thermische Zustandsgleichung erhält man die Form

$$p \cdot V_M = \mathfrak{R} \cdot T.$$

Sind n Kilomole ($n \cdot M$ Kilogramm) in einem Gasvolumen V enthalten, gilt

$$p \cdot V = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T.$$

Diese Form entspricht der Gleichung

$$p \cdot V = G \cdot R \cdot T,$$

denn n Mole ergeben die gesamte Gasmenge in kg ($n \cdot M = G$ Kilogramm).

Die bisher angeführten Beziehungen gelten streng nur für *ideale Gase*. Bei *realen Gasen* ist eine Korrektur notwendig, da einerseits bei hohen Drücken Wechselbeziehungen zwischen den Molekülen (Kohäsionskräfte) auftreten und andererseits die Moleküle durch ihre Dimension einen gewissen Raum einnehmen (Eigenvolumen).

Die *isotherme Zustandsgleichung*, die für ideale Gase $p \cdot V = \text{konst.}$

lautet, erhält für reale Gase beispielsweise die Form

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = \text{konst.}$$

p = gemessener Gasdruck in Pa

V = gemessenes Gasvolumen in m^3

b = Eigenvolumen der Moleküle in m^3

$\frac{a}{V^2}$ = Korrekturglied von Kohäsionskräften in Pa
(a und b sind für jedes Gas bestimmbare Konstanten).

4.4. Die kalorischen Zustandsgrößen und ihre Funktion bei wärmetechnischen Prozessen

Außer den thermischen Zustandsgrößen (p , V , T) sind bei wärmetechnischen Prozessen die *kalorischen Zustandsgrößen* von Bedeutung. Kalorische Zustandsgrößen sind die *innere Energie*, die *Enthalpie* und die *Entropie*.

4.4.1. Spezifische Wärme und innere Energie

Es ist allgemein bekannt, daß zur Erwärmung von 1 kg Wasser um 1 K eine andere Wärmemenge nötig ist, als z. B. zur Erwärmung von 1 kg Benzol um 1 K. Diejenige Wärmemenge, die bezogen wird auf 1 kg und eine Temperatursteigerung von 1 K, nennt man *spezifische Wärme* (in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$). Ihr Symbol ist c . Die von einer Stoffmenge G aufgenommene Wärmemenge bei Erwärmung ΔT K ist demnach

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta T.$$

Da die spezifische Wärme, wie genaue Messungen ergeben haben, temperaturabhängig ist, rechnet man in der Praxis innerhalb bestimmter Temperaturbereiche mit der mittleren spezifischen Wärme c_m . Für Wasser hat die mittlere spezifische Wärme zwischen 0 °C und 100 °C den Wert 4,19 und für Benzol zwischen 0 °C und 80 °C den Wert 1,84. Wird die Temperatur so weit gesteigert, daß der Siedepunkt erreicht ist, ändert sich bei weiterer Wärmezufuhr die Temperatur zunächst nicht mehr, sondern es erfolgt jetzt eine Änderung des Aggregatzustandes. Aus der Flüssigkeit entsteht Dampf (Bild 4.4.). Soll das Medium vollständig verdampfen, so sind, vom Siedepunkt ausgehend, je kg Wasser und je kg Benzol folgende Wärmemengen (Verdampfungswärmen) erforderlich, wenn der Vorgang bei einem Druck von 101,3 kPa (760 Torr) erfolgt:

$$\text{für Wasser } 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}};$$

$$\text{für Benzol } 394 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Die Medien binden also unterschiedliche Energiebeträge, um einen bestimmten Zustand anzunehmen. Dabei muß es sich nicht unbedingt um Wärmeenergie handeln, die dem Stoff zugeführt wird, sondern alle Energieformen können dabei einwirken. Die Energiebeträge bzw. die Summe der

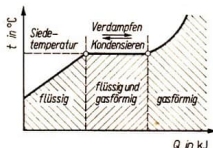


Bild 4.4.
Wärme und Änderung des Aggregatzustandes

Bindungsenergien, die ein Stoff vom Ausgangszustand bis zum Erreichen eines bestimmten Endzustandes aufnimmt, wird *innere Energie* mit dem Kurzzeichen U in kJ genannt.

Die innere Energie ist in den Molekülen enthalten. Ihre Größe wird demnach von der Masse (Stoffmenge) bestimmt. Innere Energie und Stoffmenge sind proportional

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{G_1}{G_2}.$$

4.4.2. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (2. Form)

Welche Bedeutung die innere Energie bei wärmetechnischen Prozessen besitzt, zeigt die nachfolgende Überlegung.

Einem bestimmten Gasvolumen V soll in einem wärmedichten Zylinder, der seitlich durch einen reibungslos verschiebbaren Kolben mit entsprechendem Querschnitt A abgeschlossen ist, durch eine besondere Anlage Wärme zugeführt werden (Bild 4.5.).

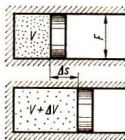


Bild 4.5.
Innere Energie und äußere Arbeit

Durch die Erwärmung wird sich das Gas um den Betrag ΔV ausdehnen und den Kolben um den Wert Δs bewegen. Ist die Wärmezufuhr sehr gering, so daß auch der Kolbenweg Δs sehr klein ist, kann mit konstantem

Druck p gerechnet werden. Das Gas leistet dabei folgende Arbeit:

$$W_A = p \cdot A \cdot \Delta s \quad \text{oder} \quad W_A = p \cdot \Delta V.$$

Das Produkt aus Druck ($p = \frac{N}{m^2}$) und Volumen (m^3) wird Druckvolumenarbeit ($\frac{N \cdot m^3}{m^2} = Nm = J$) genannt und ist im p - V -Diagramm geometrisch durch eine Fläche bestimmbar (Bild 4.6.). Diese Tatsache macht man sich bei der Untersuchung von Kraft- und Arbeitsmaschinen zunutze.

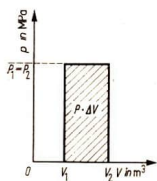


Bild 4.6.
Druckvolumenarbeit

Die zugeführte Wärmemenge Q erhöht somit einerseits die Bewegungsenergie der Moleküle, also die innere Energie U , andererseits deckt sie die äußere Arbeit W_A bei der Volumenänderung ΔV . Die Summe aus der Änderung der inneren Energie und der äußeren Arbeit ist gleich der zugeführten Wärmemenge

$$Q = U + W_A \quad \text{bzw.}$$

$$Q - U - W_A = 0.$$

Diese Gleichung stellt die allgemeine quantitative Formulierung des ersten Hauptsatzes dar. Oftmals spricht man auch von der *zweiten Form des ersten Hauptsatzes*. In Worten ausgedrückt, besagt diese:

Die Summe aus vollbrachter äußerer Arbeit und Änderung der inneren Energie ist gleich der zugeführten Wärmemenge.

4.4.3. Adiabatische Zustandsänderung

Bei einer Zustandsänderung eines Stoffes können demnach die drei Energieformen Wärme, innere Energie und äußere Arbeit

beteiligt sein. Es ist aber auch denkbar, daß nur zwei wirksam auftreten und die dritte unverändert bleibt. Somit gibt es drei Sonderfälle

$$Q = 0$$

$$\Delta U = 0$$

$$W_A = 0.$$

Der erste Sonderfall soll etwas näher untersucht werden. Er tritt auf, wenn sich ein Gas in einem wärmedichten Zylinder ausdehnt und dadurch äußere Arbeit verrichtet. Da bei der angeführten Bedingung ein Wärmeaustausch mit der Umgebung nicht stattfindet, muß der Energiebedarf, der zur Deckung der Ausdehnungsarbeit nötig ist, aus der inneren Energie des Gases stammen. Setzt man für die verrichtete äußere Arbeit die Druckvolumenarbeit $p \cdot \Delta V$, so ergibt sich

$$\Delta U + p \cdot \Delta V = 0$$

$$\Delta U = -p \cdot \Delta V$$

$$p \cdot \Delta V = -\Delta U.$$

Hieraus ist zu erkennen, daß die innere Energie abnimmt, d. h., das Gas kühlt sich ab. Eine derartige Zustandsänderung, bei der kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, wird *adiabatische Zustandsänderung* genannt. Auch die adiabatische Zustandsänderung kann im p - V -Diagramm dargestellt werden. Der spezielle Verlauf ist von einigen Faktoren abhängig, die zunächst noch untersucht werden sollen.

Aus den bisherigen Betrachtungen ergab sich, daß bei adiabatischer Zustandsänderung äußere Arbeit $p \cdot \Delta V$ verrichtet wird, wobei sich die Temperatur des Gases um den Betrag T und die innere Energie entsprechend um den Betrag ΔU verändert. Das Verhältnis $\Delta T : \Delta U$ ist, wie bereits erwähnt, von den spezifischen Wärmen der Stoffe abhängig. Bei Gasen ist zu beachten, daß die spezifischen Wärmen außerdem vom Zustand abhängen. Es besteht demnach ein Unterschied, ob z. B. 1 kg Gas bei konstantem Druck oder bei konstantem Volumen um 1 K erwärmt wird, da bei kon-

stantem Druck durch Volumenänderung zusätzlich äußere Arbeit verrichtet wird. Diese Arbeit muß durch entsprechende Wärmezufuhr gedeckt werden. Bei Gasen und Dämpfen, also leicht kompressiblen Stoffen, muß man deshalb zwei charakteristische Größen für die spezifische Wärme unterscheiden:

die spezifische Wärme bei konstantem Druck c_p (in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$) und die spezifische Wärme bei konstantem Volumen c_v (in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$).

Die spezifische Wärme bei konstantem Druck ist um die äußere Arbeit größer als die spezifische Wärme bei konstantem Volumen

$$c_p > c_v.$$

Die Wärmemenge Q , die einer Gasmenge G bei Erwärmung von T_1 auf T_2 zugeführt wird, ist bei konstantem Druck

$$Q = G \cdot c_p (T_2 - T_1)$$

und bei konstantem Volumen

$$Q = G \cdot c_v (T_2 - T_1).$$

Der Zuwachs an innerer Energie bei 1 kg Gas ist demnach $c_v \cdot (T_2 - T_1)$.

Die quantitative Formulierung des 1. Hauptsatzes

$$Q = \Delta U + W_A$$

kann deshalb auch geschrieben werden

$$Q = G \cdot c_v \cdot \Delta T + W_A$$

(allgemeine Wärmegleichung).

Daraus ergibt sich, wenn $Q = 0$ ist, allgemein

$$\Delta U = -p \cdot \Delta V = c_v \cdot \Delta T.$$

Aus der Gleichung ist zu erkennen, daß die innere Energie eine Funktion der Temperatur ist. Da bei adiabatischer Zustandsänderung gleichzeitig auch Temperaturveränderungen auftreten, verlaufen die Adiabaten im p - V -Diagramm entsprechend steiler als die Isothermen. Ihr spezieller Ver-

lauf wird durch das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa$$

bestimmt und entspricht der Funktionsgleichung

$$p \cdot V^\kappa = \text{konst. (Bild 4.7.)}$$

κ wird als Adiabatenexponent bezeichnet.

Werden die bisher behandelten Zustandsänderungen einheitlich im p - V -Diagramm dargestellt (Bilder 4.8. bis 4.11.), sind für

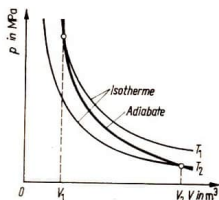


Bild 4.7. Verlauf der Adiabaten

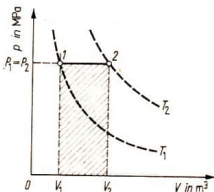


Bild 4.8. Isochore Zustandsänderung

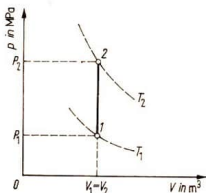


Bild 4.9. Isobare Zustandsänderung

die Kurvenzüge folgende Beziehungen zu erkennen:

Isochore (konstantes Volumen)
 $p \cdot V^\infty = \text{konst.}$

Isobare (konstanter Druck)
 $p \cdot V^0 = \text{konst.}$

Isotherme (konstante Temperatur)
 $p \cdot V^1 = \text{konst.}$

Adiabate (konstante Entropie)
 $p \cdot V^\kappa = \text{konst.}$

Die Zustandsänderungen können also allgemein in die mathematische Form

$$p \cdot V^m = \text{konst.}$$

gebracht werden, wobei die bisher behandelten Zustandsänderungen Sonderfälle darstellen. Trägt man diese Sonderfälle gemeinsam in ein p - V -Diagramm ein (Bild 4.12.), so ist ersichtlich, daß zwischen Isochore ($m = \infty$) und Isobare ($m = 0$) beliebige Zustandsänderungen liegen können (Bild 4.13.). Derartige Zustandsänderungen werden *polytrope Zustandsänderungen* genannt. In der Regel liegen die Polytropen zwischen Adiabate und Isotherme (Kolbenmaschinen). Ihr spezieller Verlauf wird nach der Gleichung $p \cdot V^m = \text{konst.}$ bestimmt, wobei m meist, wie bereits gezeigt, zwischen den Werten 1 und 1,4 liegt (Bild 4.14.).

4.4.4. Technische Arbeit durch Zustandsänderung

Während bei den bisherigen Betrachtungen immer nur eine einmalige Zustandsänderung und auch nur eine einmalige Arbeitsverrichtung auftrat, erfolgt in der Maschine

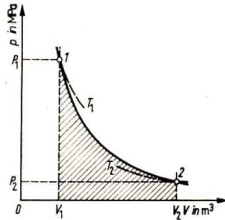


Bild 4.11. Adiabate Zustandsänderung

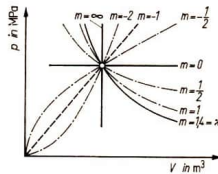


Bild 4.12. Polytrope mit verschiedenen Exponenten m

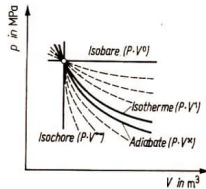


Bild 4.13. Isobare, Isochore, Isotherme und Adiabate als Sonderfälle der Polytropen im p - V -Diagramm

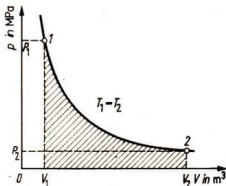


Bild 4.10. Isotherme Zustandsänderung

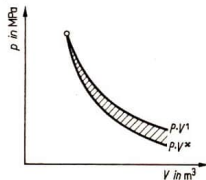


Bild 4.14. Gebiet der Adiabaten mit Exponenten zwischen 1 und κ

eine laufende Zustandsänderung und demnach auch eine laufende Arbeitsverrichtung. Dabei verbleibt das Arbeitsmedium (z. B. Gas, Dampf) nicht in der Maschine, sondern es durchströmt diese. Es tritt also in einem bestimmten Zustand ein, durchläuft einen Energiewandlungsprozeß und tritt in einem anderen Zustand wieder aus. Die dabei verrichtete Arbeit, die G kg Arbeitsmittel in der Maschine erzeugen, wird *technische Arbeit* $W_{A\text{ techn}}$ genannt. Ihre Größe ist von der laufenden Zustandsänderung des Arbeitsmittels abhängig.

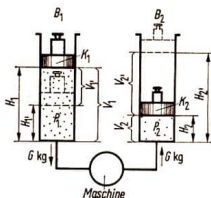


Bild 4.15. Laufende Zustandsänderung eines gasförmigen Stoffes beim Durchströmen einer wärmedichten Maschine

Als Beispiel sei die laufende Zustandsänderung eines gasförmigen Stoffes, der eine wärmedichte Maschine durchströmt, gewählt (Bild 4.15.). Die Anlage besteht aus der Maschine und zwei zylindrischen Behältern (B_1 und B_2) vom gleichen Durchmesser, die durch die reibungslos verschiebbaren Kolben K_1 und K_2 abgeschlossen werden. Im Behälter B_1 befindet sich ein Gasvolumen V_1 vom Zustand 1 und im Behälter B_2 ein Gasvolumen V_2 vom Zustand 2. Das Gas in B_1 besitzt durch das Kolbengewicht G_{K_1} einen Druck p_1 und das Gas in B_2 entsprechend durch das Kolbengewicht G_{K_2} einen Druck p_2 , wobei $G_{K_1} > G_{K_2}$ und somit $p_1 > p_2$ sein soll. Bei diesen Bedingungen liegen in dem System folgende Energiebeträge vor:

1. potentielle Energie E_{PH_1} des Kolbens im Behälter B_1 (in J)

(E_{PH_1} drückt die Lageenergie des Kolbengewichtes G_{K_1} (in N) bei einer Lage von H_1 (in m) über dem Bezugsniveau aus.)

$$E_{PH_1} = G_{K_1} \cdot H_1 \text{ (in J)}$$

2. potentielle Energie E_{PH_2} des Kolbens im Behälter B_2 (in J)
3. innere Energie U des im gesamten System vorhandenen Gases (in J).

Strömt nun aus Behälter B_1 G kg Gas durch die Maschine in den Behälter B_2 , so sinkt in B_1 der Kolben K_1 entsprechend dem ausgeströmten Volumen V_1' von H_1 auf H_1' . Der Druck p_1 bleibt durch das unveränderte Kolbengewicht konstant. In B_2 dagegen vergrößert sich das Gasvolumen V_2 um V_2' , d. h., der Kolben K_2 wird von H_2 auf H_2' gehoben. Auch im Behälter B_2 bleibt der Druck p_2 konstant. Das Volumen V_2' wird durch die eintretende Expansion des Gases größer als V_1' .

Die Energiebeträge in dem System *nach* dem Vorgang sind:

1. potentielle Energie $E_{PH_1'}$ des Kolbens im Behälter B_1 (in J)
2. potentielle Energie $E_{PH_2'}$ des Kolbens im Behälter B_2 (in J)
3. innere Energie U des im gesamten System vorliegenden Gases (in J)
4. technische Arbeit $W_{A\text{ techn}}$ in der Maschine (in J).

Da bei dem betrachteten Vorgang G kg aus Behälter B_1 durch die Maschine in Behälter B_2 geströmt sind, braucht man nicht die innere Energie des im gesamten System vorliegenden Gases, sondern jeweils nur die innere Energie für G kg im Zustand 1 (U_1) und entsprechend die innere Energie für G kg Gas im Zustand 2 (U_2) zu berücksichtigen.

Nach dem Energieprinzip (vgl. S. 105) ergibt sich

$$\begin{aligned} U_1 + E_{PH_1} + E_{PH_2} &= \\ &= U_2 + E_{PH_1'} + E_{PH_2'} + W_{A\text{ techn}} \end{aligned}$$

oder nach Umstellung

$$U_1 + (E_{pH_1} - E_{pH_1'}) = \\ = U_2 + (E_{pH_2'} - E_{pH_2}) + W_{A \text{ techn.}}$$

Die Klammerausdrücke können, wie auch aus Bild 4.10. hervorgeht, durch die Produkte aus den zugehörigen Drücken und Volumina ersetzt werden.

$$(E_{pH_1} - E_{pH_1'}) = p_1 \cdot V_1'$$

$$(E_{pH_2'} - E_{pH_2}) = p_2 \cdot V_2'.$$

Werden diese Werte in obige Gleichung eingesetzt, erhält man

$$U_1 + p_1 \cdot V_1' = U_2 + p_2 \cdot V_2' + W_{A \text{ techn.}},$$

und für die technische Arbeit gilt

$$W_{A \text{ techn.}} = (U_1 + p_1 \cdot V_1') - \\ - (U_2 + p_2 \cdot V_2').$$

Die technische Arbeit ist demnach die Differenz zweier Summen, die sich beide aus innerer Energie und Druckvolumenarbeit zusammensetzen. Diese Druckvolumenarbeit ist nötig, um dem Arbeitsmittel in seiner Umgebung Platz zu machen, und ist, bezogen auf die Maschine, einmal als Füllungsarbeit und zum anderen als Ausschubarbeit wirksam. Sie wird deshalb auch allgemein *Verdrängungsarbeit* genannt und als Zustandsgröße betrachtet. Da die innere Energie ebenfalls eine Zustandsgröße ist, wurde für die Summe $U + p \cdot V$ eine neue Zustandsgröße eingeführt, die man mit *Enthalpie* H (in kJ) oder h (in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$) bezeichnet. (Enthalpie wird oft auch *Wärmeinhalt* genannt.) Die Enthalpie ist demnach gleich der Summe der inneren Energie und der Verdrängungsarbeit.

$$H = U + p \cdot V.$$

Für die technische Arbeit ergibt sich bei Einführung der Enthalpie

$$W_{A \text{ techn.}} = H_1 - H_2 = G(h_1 - h_2).$$

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die technische Arbeit bei jeder wärmedichten Maschine gleich dem Unterschied der Enthalpie des Arbeitsmittels vor und nach der Arbeitsverrichtung ist. Diese wichtige Aussage gilt nicht nur für die Wärmekraftmaschinen, sondern für jede Maschine.

4.4.5. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (3. Form)

Werden die bereits genannten Beziehungen auf ein System übertragen, das die Zufuhr von Wärme berücksichtigt, so erhält auch der erste Hauptsatz eine neue Form.

Bisher galt

$$Q = W_A \quad (1. \text{ Form})$$

$$Q = U + W_A \quad (2. \text{ Form})$$

Durch Einführung der Enthalpie in die zweite Form erhält man

$$Q + H_1 = H_2 + W_{A \text{ techn.}}$$

oder

$$Q = H_2 - H_1 + W_{A \text{ techn.}}$$

Diese Form wird auch *dritte Form des ersten Hauptsatzes* genannt.

In Worten besagt diese:

Ändert ein Stoff bei Wärmezufuhr seinen Zustand und seinen Ort unter Verrichtung einer Arbeit, dann ist die Summe aus der technischen Arbeit und der Enthalpiedifferenz des Stoffes gleich der zugeführten Wärmemenge.

4.5. Reversible und irreversible Vorgänge

Werden die drei Formen des ersten Hauptsatzes inhaltlich zusammengefaßt, kann man feststellen, daß der Gesamtenergiegehalt eines abgeschlossenen Systems trotz aller vor sich gehenden Veränderungen konstant bleibt (Erhaltung der Energie). Über den Verlauf der Energieumwandlungen gibt der erste Hauptsatz keinen Auf-

schluß. Es können sich demnach innerhalb eines Systems auch Energieumsetzungen vollziehen, ohne daß nach außen energetische Veränderungen ausgelöst werden. Diese Energieumsetzungen verlaufen umkehrbar (reversibel) oder nicht umkehrbar (irreversibel). Einen reversiblen Prozeß finden wir z. B. bei der adiabatischen Zustandsänderung. Auf Seite 109 haben wir kennengelernt, daß bei adiabatischer Expansion kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, sondern sich lediglich die innere Energie verringert. Wird nun das Gas wieder adiabatisch komprimiert, dann nimmt auch seine innere Energie wieder zu. Es läßt sich also der ursprüngliche Zustand wieder herstellen, ohne daß ein Energieaustausch mit der Umgebung stattgefunden hat. Reversible Prozesse sind also solche, die durch Umkehrung des Vorganges wieder zum Anfangszustand führen, ohne daß in der Umgebung eine bleibende Zustandsänderung auftritt. Auch Vorgänge in der Mechanik können umkehrbar sein, wie z. B. die reibungslose Pendelbewegung oder die Springbewegung einer reibungslos fallenden Kugel bei vollkommen elastischem Stoß. Prozesse, die durch Umkehrung des Vorganges bei angeführten Bedingungen nicht wieder zum Anfangszustand führen, sind irreversibel. Zu diesen zählen diejenigen, bei denen Reibung oder Wärmeleitung auftritt. Grundsätzlich kann gesagt werden, daß die Prozesse irreversibel sind, wenn irgendeine Energieform speziell in Wärme übergeht. Auch die angeführten reversiblen Vorgänge sind nur im Idealfall vollkommen umkehrbar.

4.6. Kreisprozesse

Bei den reversiblen Prozessen bestand die Forderung, daß durch Umkehr des Vorganges der Anfangszustand wieder erreicht wird, ohne daß in der Umgebung eine bleibende Zustandsänderung auftritt. Dabei ist unwesentlich, auf welchem Weg die Rückführung in den Anfangszustand erfolgt. Bei

freiem Fall einer Kugel mit anschließendem elastischem Stoßvorgang erfolgt beispielsweise die Rückführung auf dem gleichen Weg. Es ist auch denkbar, daß sich die Kugel reibungsfrei in einem in sich geschlossenen, vertikal angeordneten Rohr bewegt (Bild 4.16.).

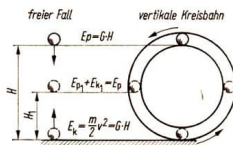


Bild 4.16. Rückführung in den Anfangszustand auf verschiedenen Wegen

Bei einer Kolbenmaschine ist z. B. eine laufende Umwandlung in mechanische Energie nur möglich, wenn sich der Kolben im Zylinder hin- und herbewegt und nach einer Kurbelwellenumdrehung seine Ausgangsstellung wieder einnimmt. Das Arbeitsmittel muß dann ebenfalls, unabhängig von den vorangegangenen Zustandsänderungen, den Anfangszustand besitzen. Das läßt sich praktisch dadurch erreichen, daß entweder immer das gleiche Arbeitsmittel durch das System kreist, oder es wird das alte Arbeitsmittel durch ein neues ersetzt.

Den Vorgang, bei dem das Medium nach dem Durchlaufen verschiedener Zustandsänderungen wieder den Anfangszustand einnimmt, nennt man einen Kreisprozeß. Er ist besonders für die periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen von Bedeutung und bestimmt maßgebend deren thermischen Wirkungsgrad (= Verhältnis zwischen ausgenutzter und aufgewendeter Wärme). Einen für die Wärmekraftmaschinen besonders günstigen Kreisprozeß stellte 1824 der Franzose Carnot auf. Dieser Prozeß ergibt theoretisch den besten Wirkungsgrad und ist allgemein als *Carnotscher Kreisprozeß* bekannt. Carnot ging dabei von

der Bedingung aus, daß das Gas in einem Zylinder, der mit zwei Wärmebehältern verschiedener Temperatur in Verbindung steht, eingeschlossen ist. Ein Wärmeaustausch soll nur zwischen Zylinder und Wärmebehältern möglich sein. Ferner setzte er voraus, daß alle Vorgänge reibungsfrei verlaufen. Das Gas selbst soll im Kreisprozeß zunächst isotherm und darauffolgend adiabatisch komprimiert werden. Bei diesen Zustandsänderungen treten folgende Energieumsetzungen auf (Bild 4.17.):

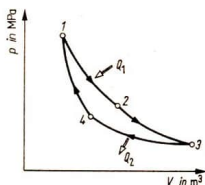


Bild 4.17.
Der Carnotsche
Kreisprozeß
(nicht maß-
stäblich)

1. Isotherme Expansion (Kurve 1 bis 2) Gas dehnt sich aus und verrichtet äußere Arbeit. Um Abkühlung zu verhindern, muß Wärme zugeführt werden.
2. Adiabatische Expansion (Kurve 2 bis 3) Gas dehnt sich aus und verrichtet äußere Arbeit, wobei Abkühlung eintritt. Wärmeaustausch erfolgt nicht.
3. Isotherme Kompression (Kurve 3 bis 4) Gas wird durch Arbeitsaufwand verdichtet. Um Erwärmung zu vermeiden, muß Wärme abgeleitet werden.
4. Adiabatische Kompression (Kurve 4 bis 1) Gas wird durch Arbeitsaufwand verdichtet, wobei es sich auf Ausgangstemperatur erwärmt. Wärmeaustausch erfolgt nicht.

Im p - V -Diagramm stellt das von den Kurven eingeschlossene Feld die indizierte Nutzarbeit W_{Ai} (maximal gewinnbare technische Arbeit) dar. Ihre Größe wird durch die Differenz der zu- und abgeführten Wärmemengen bestimmt:

$$W_{Ai} = Q_1 - Q_2.$$

Aus dem Bedürfnis heraus, diese Wärmemengen als Flächen eines Diagramms im rechtwinkligen Koordinatensystem darzustellen, wurde eine neue kalorische Zustandsgröße (die Entropie S) festgelegt. Wie aus den Kurvenzügen des Carnotprozesses hervorgeht, wird bei diesem eine Wärmemenge Q_1 bei konstanter Temperatur T_1 zugeführt (isotherme Expansion) und eine Wärmemenge Q_2 bei einer niederen konstanten Temperatur T_2 abgeführt (isotherme Kompression). Der thermische Wirkungsgrad (η_{th}) eines Carnotschen Kreisprozesses zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 ist

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Aus dieser Gleichung folgt

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2},$$

d. h., die Wärmemengen verhalten sich wie die Temperaturen, bei denen sie umgesetzt werden. Der Quotient $\frac{Q}{T}$ kann durch die neue Größe S (Entropie) ersetzt werden:

$$\frac{Q}{T} = S \text{ in } \frac{\text{kJ}}{\text{K}}.$$

Da die Größe S erstmalig Clausius einführte, wurde nach ihm ihre Einheit benannt ($1 \text{ Clausius} = 1 \frac{\text{cal}}{\text{K}} = 4,1868 \frac{\text{J}}{\text{K}}$).

Die Entropie hat für jeden Zustand einen bestimmten Zahlenwert, so daß sich für verschiedene Zustände von Gasen und Dämpfen Entropietafeln aufstellen lassen.

Zeichnet man analog zum p - V -Diagramm ein T - S -Diagramm auf, so bildet sich der Carnotsche Kreisprozeß als Rechteck ab

(Bild 4.18.). Q_1 entspricht der Rechteckfläche mit den Eckpunkten S_1 1 2 S_2 , Q_2 der Rechteckfläche S_1 4 3 S_2 . Die in mechanische Arbeit umgesetzte Wärme wird dem-

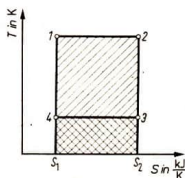


Bild 4.18.
Der Carnotsche
Kreisprozeß
im T-S-Diagramm

zufolge durch das Rechteck 1 2 3 4 charakterisiert. Ebenso läßt sich der thermische Wirkungsgrad durch das Verhältnis

$$\eta_{th} = \frac{\text{Rechteckfläche } 1 \ 2 \ 3 \ 4}{\text{Rechteckfläche } S_1 \ 1 \ 2 \ S_2}$$

ausdrücken. Bei anderen Prozessen bildet sich die Wärmemenge nicht als Rechteck, sondern als anders geformte Fläche ab.

Nach den bisher geführten Betrachtungen ist es möglich, eine Vielzahl von Kreisprozessen darzustellen. Nur wenige besitzen aber praktische Bedeutung. Bei den Energiemaschinen können als wichtigste genannt werden: der *Clausius-Rankine-Prozeß* (z. B. Dampfmaschine), der *Otto-Prozeß* (z. B. Gasmaschine, *Ottomotor*), der *Joule-Prozeß* (z. B. *Dieselmotor*) und der *Escher-Wyss-Prozeß* (z. B. Gasturbine). In den Bildern 4.19. bis 4.24. sind einige dieser Idealprozesse sowohl im *p-V*-Diagramm als auch im *T-S*-Diagramm dargestellt. (Die Darstellung erfolgte aus Gründen besserer Übersichtlichkeit nicht maßstäblich.) Aus den Abbildungen ist ersichtlich, daß der Arbeitsprozeß der verschiedenen Maschinen nicht gleich ist. Sie haben aber alle eine Gemeinsamkeit, nämlich die, daß bei mindestens einer Zustandsänderung Wärme zu- und bei einer Zustandsänderung Wärme abgeführt wird. Nur dadurch ist es möglich, Nutzarbeit zu erhalten. Im praktischen Maschinenbetrieb lassen sich die

Idealprozesse nicht verwirklichen. In den Bildern 4.25. bis 4.30. ist gezeigt, wie etwa ein Maschinenprozeß ausfällt.

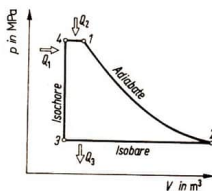


Bild 4.19.
p-V-Diagramm
vom Clausius-
Rankine-Prozeß

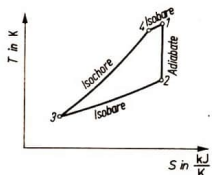


Bild 4.20.
T-S-Diagramm
vom Clausius-
Rankine-Prozeß

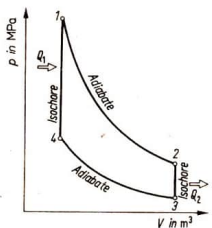


Bild 4.21.
p-V-Diagramm
vom Otto-Prozeß

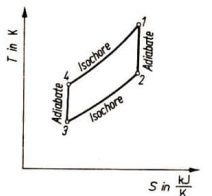


Bild 4.22.
T-S-Diagramm
vom Otto-Prozeß

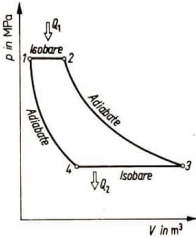


Bild 4.23.
p-V-Diagramm
vom
Joule-Prozeß

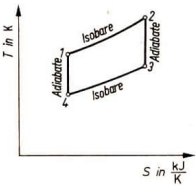


Bild 4.24.
T-S-Diagramm
vom
Joule-Prozeß

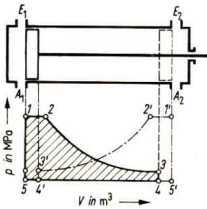


Bild 4.25.
Ideales
p-V-Diagramm
einer Dampf-
maschine

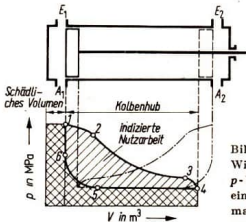


Bild 4.26.
Wirkliches
p-V-Diagramm
einer Dampf-
maschine

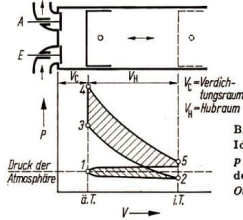


Bild 4.27.
Ideales
p-V-Diagramm
des Viertakt-
Ottomotors

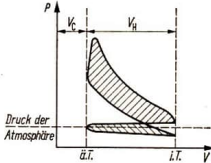


Bild 4.28.
Wirkliches
p-V-Diagramm
des Viertakt-
Ottomotors

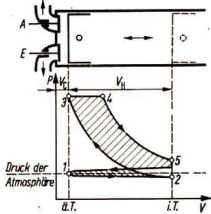


Bild 4.29.
Ideales
p-V-Diagramm
des Viertakt-
Dieselmotors

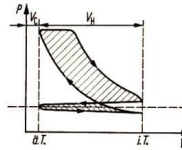


Bild 4.30.
Wirkliches
p-V-Diagramm
des Viertakt-
Dieselmotors

4.7. Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung hat große technische Bedeutung (z. B. für Kesselanlagen, Kälteaggregate, Rohrleitungssysteme). Da dieses Gebiet sehr umfangreich ist, soll an dieser Stelle nur auf einige Grundprinzipien hingewiesen werden. Grundsätzlich erfolgt eine Wärmeübertragung von wärmeren Körpern auf kältere und nicht umgekehrt. Die Übertragung der Wärmeenergie ist möglich durch Wärmeleitung, durch Wärmeübergang (Konvektion) und durch Wärmestrahlung.

Unter **Wärmeleitung** versteht man den Wärmetransport in festen oder unbewegten flüssigen bzw. gasförmigen Stoffen von Teilchen zu Teilchen. Die Moleküle höherer Temperatur geben dabei an die benachbarten Moleküle tieferer Temperatur Wärmeenergie ab, bis ein Ausgleich erfolgt. In festen Stoffen erfolgt der Wärmetransport durch Stoß der ortsgebundenen schwingenden Atome bzw. Moleküle und in Gasen durch Stoß der frei beweglichen Atome bzw. Moleküle (*Brownsche Bewegung*). Für diese Art der Wärmeübertragung ist die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes (λ) von Bedeutung (Einheit $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$). Die Wärmeleitfähigkeit ist stoffspezifisch und temperaturabhängig. Bei Gasen hat auch noch der Druck einen Einfluß. In den Bildern 4.31. und 4.32. sind Wärmeleitfähigkeiten einiger Stoffe temperaturabhängig dargestellt.

Unter **Wärmeübergang** versteht man die Übertragung der Wärmeenergie durch Konvektion von einem gasförmigen oder flüssigen Stoff auf eine feste Wand oder umgekehrt. Bei dieser Form der Wärmeübertragung üben besonders die wärmeübertragende Fläche A_w , die mittlere Temperatur des strömenden Stoffes t_f und die Wärmeübergangszahl α_w großen Einfluß aus. Dabei ist zu beachten, daß die Wärmeübergangszahl alle die Strömung und den Wärmetransport beeinflussenden Größen zusammenfaßt und jeweils nur experimentell bestimmt werden kann. Für die Berechnung des Wärmeübergangs gilt der Grundaussatz $Q = \alpha_w A_w (t_f - t_w)$.

Bei der **Wärmeübertragung durch Strahlung** wirkt die Gesetzmäßigkeit, daß jeder Körper mit einer höheren Temperatur als 0 K Wärmeenergie in Form elektromagnetischer Wellen ausstrahlt. Beim Auftreffen dieser elektromagnetischen Wellen auf andere Körper werden diese zum Teil wieder in Wärme umgewandelt. Zu beachten ist, daß feste und flüssige Körper in einem kontinuierlichen Spektrum aller Wellenlängen strahlen (und auch absorbieren), Gase dagegen nur in einem bestimmten Wellenbereich. Dabei kann die auf einen Körper fallende Strahlungsenergie reflektiert, absorbiert oder auch durchgelassen werden. Der reflektierte Anteil der Strahlungsenergie E wird durch die Reflexionszahl R , der absorbierte Anteil durch die Absorptionszahl A und der durchgelassene Anteil durch die Durchlaßzahl D erfaßt. Die Summe der Anteile ist stets 1 ($R + A + D = 1$).

Weiße Körper reflektieren vollkommen ($R = 1$), schwarze Körper dagegen absorbieren vollkommen ($A = 1$). Körper, die alle Strahlen durchlassen ($D = 1$) nennt man diathermane Körper. Bei grauen und farbigen Körpern treten Kombinationen auf.

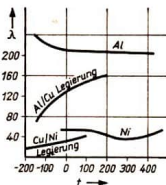


Bild 4.31.
Wärmeleitfähigkeit
von Metallen

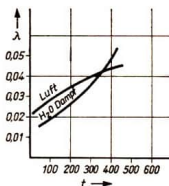


Bild 4.32.
Wärmeleitfähigkeit
von Gasen
($P_N = \text{konstant}$)

4.8. Weiterführende Literatur

- [1] Quak: Technisches Wissen, Wärme und Kraft I. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [2] Faltin: Technische Wärmelehre. Akademie-Verlag Berlin.
- [3] Bösnjaković: Technische Thermodynamik I und II. Verlag Steinkopf und Härtel, Dresden und Leipzig.
- [4] Verfasserkollektiv: Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 1. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [5] Verfasserkollektiv: Das Grundwissen des Ingenieurs. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.



5. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung

verfaßt von Dr.-Ing. D. Böhm
und Dipl.-Gwl. H. Höpfer

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt
a_k	Kerbschlagzähigkeit
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
f	Durchbiegung, Auslenkung
HB	Brinellhärte
HV	Vickershärte
HR	Rockwellhärte
W_A	Arbeit
W_b	Widerstandsmoment gegen Biegung
I	Trägheitsmoment
δ	Bruchdehnung
ϵ	Dehnung
σ	Spannung
σ_{zul}	zulässige Spannung
σ_E	Elastizitätsgrenze
σ_Z	Zugfestigkeit
σ_R	Reißfestigkeit (bei Platten)
σ_s	Streckgrenze
$\sigma_{0,2}$	Dehngrenze
φ	Brucheinschnürung

Vorbemerkung

Die moderne Technik verfügt über eine große Anzahl von Werkstoffen; die Werkstoffkunde vermittelt die Kenntnis ihrer Herstellung, ihrer Eigenschaften und ihres zweckmäßigsten Einsatzes. Im vorliegenden Abschnitt wird ein Überblick über wichtige praktisch verwendete Werkstoffe und ihre Prüfung gegeben. Dabei ist es wegen des relativ geringen Umfanges nicht möglich, auf alle Hauptgruppen einzugehen. Die Stoffauswahl ist von dem Gesichtspunkt aus erfolgt, die im Maschinen- und Gerätebau verwendeten Werkstoffe sowie das für die Schulpraxis außerdem wichtige Holz in einer praktischen Ausführlichkeit zu behandeln. Dabei wurde vom Standpunkt der Werkstoffanwendung ausgegangen und die Herstellung nur so weit gestreift, wie sie die Werkstoffeigenschaften grundlegend beeinflusst.

5.1. Metallische Werkstoffe

5.1.1. Grundlagen der allgemeinen Metallkunde

5.1.1.1. Einteilung der Metalle

Die Metalle unterscheiden sich von den Nichtmetallen durch

1. ihre hohe Festigkeit und Zähigkeit,
2. ihre gute Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme,
3. ihre Legierbarkeit und
4. den metallischen Glanz ihrer blanken Oberfläche.

Volkswirtschaftlich bedeutsam ist ihre Rückgewinnbarkeit aus dem Schrott.

Zweckmäßigerweise erfolgt die Einteilung der Metalle nach ihrer Dichte und ihrem Schmelzpunkt in höchst-, hoch- und niedrigschmelzende Schwermetalle und in Leichtmetalle. In der Übersicht 5.2. sind die wichtigsten technisch verwendeten Metalle nach diesem Schema eingetragen.

Der Begriff *Buntmetalle* für Kupfer und seine Legierungen ist nicht standardisiert.

5.1.1.2. Der kristalline Aufbau der Metalle

Metalle sind im festen Zustand kristallin. Dabei bestehen die Metallgegenstände nicht aus jeweils nur einem Kristall, sondern sind aus einer Vielzahl von kleinen Kristallen zusammengesetzt, deren Durchmesser meistens in der Größenordnung von 0,01 mm liegen. Die Ursache dafür ist, daß beim Erstarren der Metalle aus der Schmelze zahl-



Bild 5.1.
Korngrenzen an der Oberfläche eines Metallstückes (schematisch)



Gruppe	Metall	Schmelzpunkt in °C	Dichte bei 20 °C in kg dm ⁻³	Gitterkonstanten ¹ a in nm	b in nm
Höchstschmelzende	W	3 380	19,3	31,648 ²	—
Schwermetalle	Mo	2 620	10,2	31,466 ²	—
Hochschmelzende	V	1 900	6,1	30,39 ²	—
Schwermetalle	Cr	1 875	7,14	28,850 ²	—
	Fe	1 534	7,87	δ-Fe 29,4 ² bei 1 425 °C γ-Fe 36,56 ³ bei 950 °C ⁵ α-Fe 28,66 4 ²	—
	Co	1 495	8,92	ε-Co 25,07	40,69 ⁴
	Ni	1 453	8,9	35,288 ³	—
	Cu	1 083	8,96	36,153 ³	—
	Au	1 063	19,3	40,783 ³	—
	Ag	961	10,49	40,856 ³	—
Niedrigschmelzende	Zn	420	7,14	26,64	49,45 ⁴
Schwermetalle	Pb	327	11,34	49,495 ³	—
	Cd	321	8,64	29,787	56,17 ⁴
Leichtmetalle	Ti	1 668	4,51	β-Ti 33,06 ² bei 900 °C ⁶ α-Ti 29,504	46,833 ⁴
	Al	660	2,70	40,490 ³	—
	Mg	649	1,74	32,092	52,103 ⁴

¹ Bei Raumtemperatur (soweit nicht anders angegeben)

² Metall mit kubisch raumzentriertem Gitter

³ Metall mit kubisch flächenzentriertem Gitter

⁴ Metall mit hexagonalem Gitter

⁵ α-Fe ≤ 901 °C ≤ γ-Fe ≤ 1 390 °C ≤ δ-Fe ≤ Schmelzpunkt

⁶ α-Ti ≤ 883 °C ≤ β-Ti ≤ Schmelzpunkt

Übersicht 5.2.: Unterteilung der Metalle nach Dichte und Schmelzpunkt mit Angaben über Gittertyp und -konstanten (Auswahl) [3]

reiche winzige Kristalle gebildet werden und dann so lange weiterwachsen, bis sie auf benachbarte Kristalle stoßen. Dadurch erhält man keine regelmäßigen Begrenzungsflächen dieser Kristalle, wie bei frei gewachsenen Kristallen, sondern regellose Grenzflächen zwischen den Kristallen, die man deswegen als *Kristallite* oder auch *Körner* bezeichnet.

Das Bild 5.1. zeigt schematisch die Körner an der Oberfläche eines Metallstückes. Nur bei langsamer Abkühlung und unbehindertem Kristallwachstum findet man wohlausgebildete große Kristalle (mit regelmäßigen Begrenzungsflächen).

Bei Wismut läßt sich dies folgendermaßen leicht bewerkstelligen (vgl. [1]): Man schmilzt in einem halbkugelförmigen eisernen Gießlöffel (10 cm bis 15 cm Durchmesser) Wismut ein und läßt so lange erstarren, bis sich eine Kruste auf der Oberfläche gebildet hat. Dann schüttet

man die Restschmelze aus, wobei die Kruste zerbricht. Am Boden des Löffels hat sich eine Halbkugelschale gebildet, deren Innenseite mit großen Bi-Kristallen besetzt ist (Bild 5.3.).



Bild 5.3.
Frei gewachsene
Wismutkristalle

(Die Abbildung wurde den Verfassern freundlicherweise von Herrn Prof. Dr. sc. techn. H. Schumann, Rostock, zur Verfügung gestellt)



Je kleiner der mittlere Durchmesser der Kristalle (d. h. je feiner das Korn) ist, desto größer sind der Verformungswiderstand und die Zähigkeit des Metalls bei klimatischen Temperaturen (-30°C bis $+70^{\circ}\text{C}$). Nur bei relativ hohen Temperaturen weist grobkristallines Material eine höhere Dauerstandfestigkeit als feinkristallines auf (vgl. Abschnitt 5.3.2.1.). Die Kristallite des Metalls sind in der Regel nur mit dem Mikroskop sichtbar (Feingefüge). Praktisch muß die Metallprobe vorher durch Schleifen und Polieren spiegelblank gemacht werden, anschließend wird noch durch Ätzen mit geeigneten Reagenzien das Gefüge sichtbar gemacht, weil z. B. Korngrenzen und Kornflächen unterschiedlich stark angegriffen werden. Zur Untersuchung werden Mikroskope mit auffallendem Licht verwendet. Bild 5.4. zeigt das Gefüge eines technisch reinen Eisens (Körner hell, Korngrenzen dunkel).

Der Nachweis des kristallinen Aufbaus gelang 1912 *M. v. Laue, W. Friedrich und P. Knipping*, als sie fanden, daß Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein Kristallgitter gebeugt werden. In den fünf Jahrzehnten seit dieser Entdeckung ist eine große Zahl von Aufnahmeverfahren entwickelt worden, mit deren Hilfe nicht nur die Anordnung der Atome in den Kristallen der verschiedensten Stoffe, sondern auch der Abstand der einzelnen Atome auf vier bis fünf Ziffern ermittelt werden konnte. Der Typ der Atomanordnung (Gittertyp) und die Abmessungen der Elementarzelle

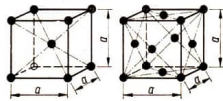


Bild 5.4. Gefüge eines technisch reinen Eisens (Vergrößerung = 200 : 1, geätzt mit alkohol. HNO_3)

(der kleinsten gesetzmäßigen Anordnung der Atome) sind einem jeden Metall eigene Konstanten. Bei den Metallen treten vor allem das kubisch raumzentrierte und das hexagonale Gitter auf (Bilder 5.5., 5.6. und 5.7.).

In den Bildern 5.5. bis 5.7. sind nur die Atommittelpunkte angegeben und zur besseren Veranschaulichung durch Geraden verbunden. Tatsächlich berühren sich die in grober Näherung als Kugeln darstellbaren Atome an ihrer Oberfläche, wie dies in Bild 5.8. am Beispiel des kubisch flächenzentrierten Gitters von γ -Eisen dargestellt ist.

Beim kubisch raumzentrierten Gitter bilden die Verbindungslinien der Atommittel-



Bilder 5.5. und 5.6. Kubisch raumzentriertes Gitter (Elementarzelle) und kubisch flächenzentriertes Gitter (Elementarzelle)

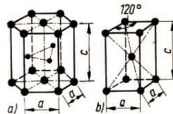
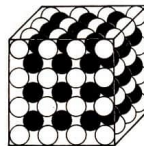


Bild 5.7. Hexagonales Gitter: a) Elementarzelle als Prisma mit regelmäßigem Sechseck als Grundfläche; b) Elementarzelle als Prisma mit Rhombus als Grundfläche, Teil von a) (Drittel)



○ Eckatome
● Flächenatome

Bild 5.8. Schema für die Packungsdichte im kubisch flächenzentrierten γ -Eisen (es sind nur die an der Vorderfläche des betrachteten Würfels liegenden Atome eingezeichnet worden, nach [2])



punkte einen Würfel (Kubus), in dessen Raummittelpunkt ein weiteres (raumzentriertes) Atom angeordnet ist. Beim kubisch flächenzentrierten Gitter treten an Stelle des Atoms im Raummittelpunkt insgesamt sechs in den Flächenmittelpunkten angeordnete Atome auf. Die Elementarzelle des hexagonalen Gitters läßt sich einmal als Prisma mit einem regelmäßigen Sechseck als Grundfläche darstellen (Bild 5.7. a), daher rührt der Name. Diese Elementarzelle läßt sich aus drei kleineren aufbauen, deren Grundfläche ein Rhombus ist (Bild 5.7. b). Kubisch flächenzentriertes und hexagonales Gitter sind dichteste Kugelpackungen.

Da nun die Elementarzellen mit einer großen Anzahl anderer im Gitterverband angeordnet sind, entfallen z. B. auf die kubisch raumzentrierte Zelle nicht die neun eingezeichneten Atome. Nur das raumzentrierte Atom gehört ihr allein, die acht Eckatome gehören gleichzeitig jeweils zu acht weiteren Zellen. Daher entfallen auf die Elementarzelle nur zwei Atome. Analog enthält die kubisch flächenzentrierte Elementarzelle insgesamt vier und die hexagonale nach Bild 5.7. b zwei Atome.

Die Strecken a und c der Elementarzellen sind die Gitterkonstanten. Sie werden in Nanometer angegeben.

Die Übersicht 5.2. gibt Beispiele für Metalle mit kubisch raumzentriertem, kubisch flächenzentriertem und hexagonalem Gitter und die zugehörigen Gitterkonstanten.

Aus dem Gittertyp der einzelnen Metalle lassen sich Rückschlüsse auf ihre Eigenschaften ziehen. So haben z. B. reine Metalle mit kubisch raumzentriertem Gitter eine Temperatur, unterhalb derer sie ihre Zähigkeit weitgehend verlieren. Reine Metalle mit kubisch flächenzentriertem Gitter zeigen diese Erscheinung nicht; sie haben auch die beste plastische Verformbarkeit.

Bei Realkristallen ist die Atomanordnung nicht wie in Bild 5.8. ideal dargestellt. Es existieren zahlreiche Gitterstörungen verschiedener Art, die die Metalleigenschaften maßgeblich beeinflussen.

5.1.1.3. Der Einfluß der Temperatur auf den Zustand reiner Metalle

Die Metalle nehmen je nach der Temperatur die Aggregatzustände fest, flüssig, gasförmig an. Dabei ist der Einfluß des Druckes, unter dem sie stehen (z. B. Luftdruck), beim Übergang vom festen zum flüssigen Zustand sehr klein, aber beim Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand ins Gewicht fallend. Den Druckeinfluß auf die $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ -Umwandlung des reinen Eisens im festen Zustand zeigt Bild 5.9. Danach tritt bei sehr großen Drücken ϵ -Eisen mit hexagonalem Gitter auf. Es wird sonst nur in legierten Stählen (z. B. mit Mn und Cr + Ni) beobachtet, weil durch die unterschiedlichen Atomradien von Eisen und den Legierungselementen ähnliche Drücke entstehen [4].

Mit Kenntnis der Übergangstemperaturen für die Übergänge fest-flüssig und eventuell noch flüssig-gasförmig lassen sich dann Zustandsschaubilder für die reinen Metalle aufstellen, wie das in den Bildern 5.10. und 5.11. (vgl. [1]) an den Beispielen von Zink und Eisen demonstriert ist.

Schmelz- und Erstarrungstemperatur sowie Siede- und Kondensationstemperatur sind jeweils bei reinen Metallen gleich, wie aus den Bildern 5.10. und 5.11. hervorgeht. In Bild 5.11. ist auch die bei manchen reinen Metallen vorhandene Erscheinung, daß in verschiedenen Temperaturbereichen unter-

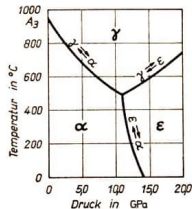


Bild 5.9. Druckeinfluß auf die Umwandlungen des reinen Eisens unter 1000 °C nach F. P. Bundy (vgl. [4])



schiedliche Kristallgitter vorliegen (allotrope Modifikationen), am Beispiel des Eisens demonstriert. Die Punkte A_2 bis A_5 sind Haltepunkte in der Abkühlungs- bzw. Erwärmungskurve des reinen Eisens (Abkürzung von Arrêt, franz. Haltepunkt). Außerdem tritt der Punkt A_1 (723 °C) bei kohlenstoffhaltigem Eisen in Erscheinung. Um ein Metall vom festen in den flüssigen Zustand zu überführen, ist eine bestimmte Schmelzwärme erforderlich. Dasselbe gilt für den Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand (Verdampfungswärme). Diese Wärmemengen werden in voller Höhe beim Kondensieren (Kondensationswärme = Verdampfungswärme) und beim Kristallisieren (Kristallisationswärme = Schmelzwärme) wieder frei. Dadurch bleibt beim Schmelzen eines reinen Metalls die Temperatur so lange konstant, bis alles feste Metall geschmolzen ist. Dasselbe gilt analog für den Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand und umgekehrt für die Kondensation und für die Erstarrung. Am Schmelz- und Erstarrungspunkt sowie beim Siede- und Kondensationspunkt haben deshalb Erwärmungs- und Abkühlkurven einen Haltepunkt (Bild 5.12).

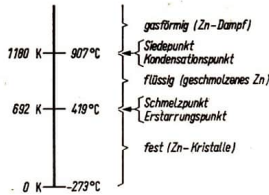


Bild 5.10. Zustandsschaubild für reines Zink (Druckeinfluß nicht berücksichtigt)

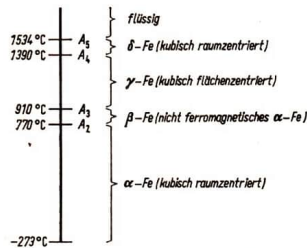


Bild 5.11. Zustandsschaubild für reines Eisen

5.1.1.4. Einiges über Zweistofflegierungen

Möglichkeiten der Legierungsbildung. Eine Legierung besteht aus mindestens zwei Elementen, von denen eines ein Metall sein muß. Dabei spricht man je nach Anzahl der Legierungselemente (Komponenten) von Zweistoff-, Dreistoff-, Vier- oder Mehrstofflegierungen.

Eine Legierung im eigentlichen Sinn kann erst gebildet werden, wenn die Komponenten im flüssigen Zustand ineinander löslich sind, also zusammengeschmolzen werden können. Im festen Zustand kann dann entweder ein Gemisch von Kristalliten aus den reinen Komponenten vorliegen, oder es können auf Grund einer Löslichkeit der Legierungselemente im festen Zustand ineinander auch Mischkristalle gebildet worden sein. In einem Mischkristall befinden sich Atome von mindestens zwei Elementen

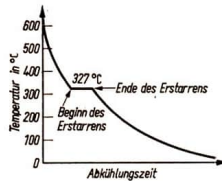


Bild 5.12. Abkühlungskurve für reines Blei

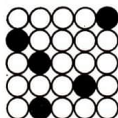
in einem gemeinsamen Raumgitter. Dabei können die normalen Gitterplätze jeweils mit Atomen der Komponenten besetzt sein (Austauschmischkristall, Bild 5.13.), oder Atome des Zusatzelementes können in Gitterlücken des Basismetalls eingebaut werden (Einlagerungsmischkristall, Bild 5.14.).

In die Gitterlücken können nur Elemente



mit sehr kleinem Atomdurchmesser, wie Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Bor, eingelagert werden.

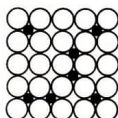
Mitunter bilden die Legierungselemente sogenannte intermetallische Phasen oder Verbindungen mit einem von den Komponenten abweichenden, meist sehr komplizierten Gitteraufbau. Da in ihnen die Atome der Legierungselemente in einem feststehenden Verhältnis eingebaut sind, lassen sie sich wie die chemischen Verbindungen in der Form A_mB_n (z. B. Fe_3C) angeben; sie werden aber nicht auf Grund der stöchiometrischen Wertigkeiten der Komponenten gebildet. Wegen ihres komplizierten Gitters sind intermetallische Phasen hart und spröde.



○ Atome
des Elements A

● Atome
des Elements B

Bild 5.13.
Austauschmischkristall
(Raumgitter)



○ Atome
des Elements A

● Atome
des Elements B

Bild 5.14.
Einlagerungsmischkristall
(Raumgitter)

Zustandsschaubilder von Zweistofflegierungen. Die Art der Legierungsbildung hängt nun völlig von den Legierungselementen ab. Der Zustand einer Legierung ist im Gleichgewichtsfall abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und der Temperatur. Bei Zweistofflegierungen sind diese Verhältnisse relativ einfach überschaubar, und es sind fast alle technisch interessierenden Legierungspaarungen eingehend experimentell untersucht worden. Im folgenden werden die wichtigsten Grundlagen über die Zustandsdiagramme der Zweistofflegierungen behandelt.

Grundsätzlich gelten Zweistoffdiagramme nur für sehr langsame Erwärmung und Abkühlung, wobei sich Gleichgewichtsver-

hältnisse zwischen den einzelnen Phasen (Phase = Erscheinungsform; eine homogene Metallschmelze ist demnach eine Phase) einstellen. Prinzipiell sind aus einem derartigen Diagramm die Temperaturen für den Übergang vom festen zum flüssigen Zustand und umgekehrt sowie die Temperaturen für den eventuellen Übergang einer Kristallart in eine andere für die reinen Legierungselemente sowie jede beliebige Legierung zwischen ihnen ablesbar.

In den Bildern 5.15.a und 5.16.a sind an den Zustandsschaubildern Wismut-Antimon und Wismut-Kadmium die Fälle der Legierungsbildung bei vollkommener Löslichkeit beider Komponenten ineinander im flüssigen und festen Zustand und der Legierungsbildung bei vollkommener Löslichkeit im flüssigen und völliger Nichtmischbarkeit im festen Zustand demonstriert. Wie in der Praxis üblich, sind die Legierungszusammensetzungen in Masse-% aufgetragen, Umrechnungsverfahren für die Bestimmung der Zusammensetzungen in Atom-% sind u. a. bei [1] angegeben. In den Bildern 5.15.b sowie 5.16.b sind Abkühlungskurven jeweils einer willkürlich herausgegriffenen Legierung gezeichnet worden, wobei die Temperaturen für Umwandlungsbeginn und Umwandlungsende den betreffenden Zweistoffdiagrammen entnommen wurden (Bilder 5.15.a und 5.16.a).

Nach den Zustandsschaubildern beginnt das Metall beim Erwärmen mit Erreichen der Soliduslinie (S) zu schmelzen, und dieses Schmelzen ist mit Erreichen der Liquiduslinie (L) beendet. Analog beginnt beim Abkühlen die Kristallisation beim Erreichen der Liquiduslinie und endet beim Erreichen der Soliduslinie. Fallen beide Linien im Diagramm zusammen (reine Metalle, eutektische Legierungen), dann ergeben sich bei der betreffenden Temperatur beim Abkühlen und Erwärmen Haltepunkte (Bild 5.12). Erhält man jedoch für eine Legierung unterschiedliche Temperaturen auf der Liquidus- und der Soliduslinie (in Bild 5.15.b, 505 °C für Liquidus- und

345 °C für Soliduslinie bei der Legierung aus 55% Wismut und 45% Antimon), dann erfolgt Kristallisation bzw. Schmelzen nicht bei einer konstanten Temperatur, sondern in einem Temperaturbereich, in dem dann Abkühlung und Erwärmung verzögert werden (Bild 5.15.b.).

Dieser Fall liegt auch bei der Legierung aus 30% Wismut und 70% Kadmium vor (Bild 5.16.b.). Da hier nach Bildung von Cd-Kristallen zwischen 250 °C und 144 °C bei 144 °C noch Eutektikum gebildet wird, folgt auf die verzögerte Abkühlung in genanntem Temperaturbereich ein Haltepunkt bei 144 °C. Das Eutektikum selbst besteht aus einem sehr feinen Gemenge aus 60% Wismut und 40% Kadmiumkristallen. Es wird bei allen Wismut-Kadmium-Legierungen, d. h. bei beliebiger Legierungszusammensetzung, gebildet. Natürlich ist seine Menge bei 60% Bi und 40% Cd am größten (100%) und nimmt mit zunehmendem Abstand der Legierungszusammensetzung von diesem Punkt ab.

Nicht immer sind die Zweistoffdiagramme so einfach wie bei den Legierungssystemen Bi-Sb und Bi-Cd aufgebaut, sondern es können auch andere charakteristische Umwandlungstypen vorkommen, z. T. mehrere gemeinsam in einem Realdiagramm (z. B. im Fe-Fe₃C-Diagramm, Bild 5.32.). Auf diese Fragen ist ausführlich bei [1] und [5] eingegangen worden. In jedem Zweistoffdiagramm existieren Liquidus- und Soliduslinie und Grenzlinien, die die Existenzbereiche verschiedener Kristallarten im festen Zustand voneinander trennen.

Zustandsschaubilder von niedrigschmelzenden Legierungssystemen, wie die in den Bildern 5.15.a und 5.16.a gezeigten, sind relativ einfach im Schulversuch nachprüfbar. Man benötigt hierzu einen Labortiegel aus Porzellan oder einer anderen Keramik (Pyrolan z. B.), ein Quecksilberthermometer mit einem Meßbereich von 0 bis 600 °C und einen kleinen elektrisch beheizten Labortiegelofen (als Behelf kann auch ein Gasbrenner dienen, dann sollte der Tiegel aber auf ein Asbestdrahtnetz gestellt werden). Man nimmt nun beispielsweise chemisch reines Blei und chemisch reines Zinn und stellt sich auch einige Legierungen aus ihnen her (durch Zusammenschmelzen beider Metalle in bekannten Masseverhältnissen im Tiegel). An diesen Werkstoffen können nun die

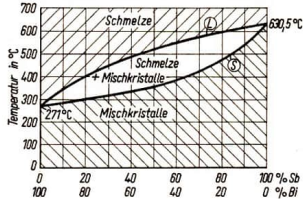


Bild 5.15.a Zustandschaubild Wismut-Antimon (völlige Mischbarkeit im flüssigen und festen Zustand, nach [3])

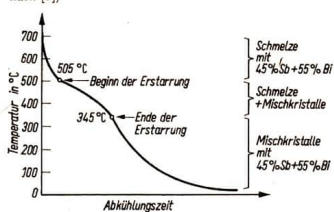


Bild 5.15.b Abkühlungskurve einer Legierung aus 45% Antimon und 55% Wismut

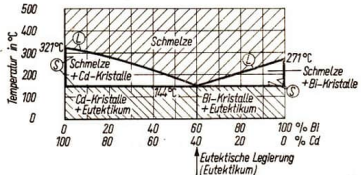


Bild 5.16.a Zustandschaubild Wismut-Kadmium (völlige Mischbarkeit im flüssigen und Nichtmischbarkeit im festen Zustand, nach [3])

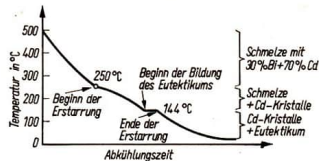


Bild 5.16.b Abkühlungskurve einer Legierung aus 30% Wismut und 70% Kadmium

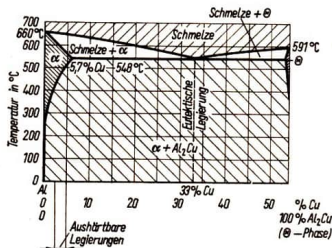


Bild 5.17. Teil des Zustandsschaubildes Aluminium-Kupfer (vgl. [3], [6])

Abkühlungskurven aufgenommen werden, indem man die Metalle schmilzt, das Thermometer eintaucht (langsam!) und dann nach Abschalten der Heizung während des Abkühlens die Temperatur in gleichbleibenden Zeitintervallen (z. B. alle 15 Sekunden) am Thermometer abliest. Die bei verschiedenen Legierungszusammensetzungen erhaltenen Knick- und Haltepunkte werden nun in das Koordinatensystem eingetragen und in geeigneter Weise durch Kurven verbunden. Es sei darauf hingewiesen, daß die so gemessenen Umwandlungstemperaturen meist etwas von den in den veröffentlichten Diagrammen angegebenen abweichen. Dies wird einmal durch die stets vorhandenen kleineren Anzeigefehler der Thermometer und bei Legierungen zusätzlich durch zu schnelles Abkühlen (keine Gleichgewichtseinstellung) verursacht. Auch unreine Ausgangsmetalle führen zu solchen Abweichungen. Es ist daher zweckmäßig, die Thermometer durch Aufnahmen der Abkühlungskurven reiner Metalle (Sn 232 °C, Bi 271 °C, Pb 327 °C, Zn 420 °C) zu eichen, wofür auch noch der Siedepunkt des Wassers herangezogen werden kann.

Mischkristalle mit temperaturabhängiger Löslichkeit (Aushärtung). In einigen Legierungssystemen treten Mischkristalle auf, die zum überwiegenden Teil aus der einen Komponente bestehen und im Gleichgewichtsfall eine mit fallender Temperatur abnehmende Löslichkeit für die andere Komponente besitzen. Dieser Fall tritt z. B. bei den aluminiumreichen Al-Cu-Legierungen auf, wofür in Bild 5.17. ein Teil des Zustandsschaubildes Aluminium-Kupfer gezeigt ist. Dabei ist die Aluminiumseite bis zur intermetallischen Phase Al_2Cu (θ -Phase) gezeichnet worden.

Technische Bedeutung besitzen die Legierungen mit 2,5% bis 5% Cu, die bei Tempe-

raturen um 500 °C nur homogene α -Mischkristalle im Gefüge haben, aus denen sich bei langsamer Abkühlung beim Unterschreiten der Phasengrenzlinie Al_2Cu ausscheidet [$\alpha \rightarrow \alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ (θ -Phase)]. Durch schnelles Abkühlen (Abschrecken) wird diese Ausscheidung unterdrückt, und man erhält bei Raumtemperatur übersättigte α -Mischkristalle, deren Festigkeit im Laufe der Zeit bis auf einen Maximalwert ansteigt (Bild 5.18.). Diese Erscheinung bezeichnet man als *Aushärtung*.

Die Festigkeitssteigerung wird durch Entmischungsvorgänge im Aluminium verursacht. Dabei sind die beiden Mechanismen einphasige und zweiphasige Entmischung zu unterscheiden. Im ersten Fall, der bei Al-Cu-Legierungen um Raumtemperatur verläuft und deswegen technologisch als Kaltaushärtung bezeichnet wird, werden Cu-Atome in besondere Gitterplätze des α -Mischkristalls eingebaut. Die zweiphasige Entmischung verläuft bei Al-Cu-Legierungen zwischen 100 °C und 200 °C (technologisch Warmaushärtung) und wird durch Ausscheidung feinsten θ -Partikel im α -Mischkristall verursacht. Die Temperaturgrenzen für die ein- und zweiphasige Entmischung sind legierungsabhängig. Allgemein gilt

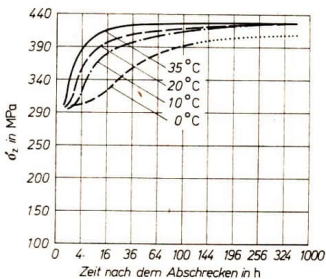


Bild 5.18. Änderung der Zugfestigkeit einer Al-Cu-Mg-Legierung nach Abschrecken von 500 °C (Lagerung bei verschiedenen Temperaturen) (nach v. Zuerleider) [6]



noch, daß mit steigender Aushärtungstemperatur die Aushärtung immer schneller verläuft (Bild 5.18.). Außer Aluminiumlegierungen gibt es auch eine große Zahl weiterer Legierungen, die technisch ausgehärtet verwendet werden, unter ihnen z. B. warmfeste Stähle. Die Erscheinung ist 1906 erstmalig an einer Al-Cu-Mg-Legierung von A. Wilm beobachtet worden. Die technischen aushärtbaren Aluminium-Kupfer-Legierungen erhalten zur besseren Aushärtung noch 0,2% bis 1,8% Mg.

5.1.1.5. Der Einfluß von Verarbeitungsverfahren auf metallische Werkstoffe

Urformverfahren. Als Urformen bezeichnet die Fertigungstechnik nach TGL 21 639 Verfahren, durch die ein Zusammenhalt eines vorher formlosen (z. B. flüssigen, pulverförmigen) Werkstoffes geschaffen wird. Die wichtigsten bei Metallen angewendeten Urformverfahren sind Gießen und Sintern.

Beim *Gießen* wird der feste Zusammenhalt des Werkstoffes durch sein Kristallisieren aus der flüssigen Phase geschaffen. Prinzipiell werden Blöcke für die Weiterverarbeitung im Walzwerk (Blockguß) und Fertigstücke (Formguß) hergestellt; hinzu kommt neuerdings noch der Strangguß, bei dem Stränge mit vorgegebener Querschnittsform kontinuierlich vergossen werden.

Grundlage für die Schmelz- und Erstarrungstemperatur der Gußwerkstoffe sind die betreffenden Zustandsschaubilder; wegen der zu großen Erwärmungs- und Abkühlungsgeschwindigkeit können sich jedoch keine Gleichgewichte einstellen, und die Phasengrenzlinien verschieben sich. Das führt u. a. zu ungleichmäßig aufgebauten Mischkristallen (Kristallseigerungen).



Zone I: Feinkristallines Gefüge (Beginn der Erstarrung); Zone II: In Richtung des Wärmegefälles gewachsene Kristalle (Stengelskristalle); Zone III: Grobkristalline innere Zone (Ende der Erstarrung)

Bild 5.19. Schnitt durch einen Gußblock mit Gußgefüge (schematisch, vgl. [1])

Die Kristallisation erfolgt von in der Schmelze vorhandenen Kristallisationskeimen aus. Das Gefüge wird feinkörnig, wenn die Anzahl dieser Keime groß und die Wachstumsgeschwindigkeit der einzelnen Kristalle klein ist. Das Gefüge wird grobkörnig, wenn die Keimzahl klein und die Wachstumsgeschwindigkeit groß ist. Die ersten Kristalle werden an der am schnellsten abkühlenden Stelle der Schmelze gebildet; demzufolge beginnt die Erstarrung an der Formwand. Bild 5.19. zeigt die prinzipielle Ausbildung des Gußgefüges über dem Querschnitt eines Gußstückes.

Keimzahl und Kristallisationsgeschwindigkeit sind von der Höhe der Gießtemperatur und der Abkühlgeschwindigkeit abhängig und damit auch die Größe der gebildeten Kristallite. Bild 5.20. zeigt schematisch diese Zusammenhänge. Demnach wird die Stengelkristallbildung bei überhitztem Guß und relativ langsamer Abkühlung erhalten und verschwindet bei schneller Abkühlung auch nach überhitztem Guß.

Bei relativ niedriger Gießtemperatur wird sie auch bei langsamer Abkühlung nicht beobachtet. Da Sandformen schlechteres Wärmeleitvermögen als Metalkokillen besitzen, ist die Abkühlgeschwindigkeit in ihnen auch geringer. Da unter sonst gleichen Gießbedingungen Kokillenguß ein feinkörnigeres Gefüge als Sandguß und somit günstigere mechanische Eigenschaften (vgl. Abschnitt 5.1.1.2.) besitzt¹, ist Kokillenguß auch in dieser Hinsicht hochwertiger als Sandguß. Stengelkristallbildung ist wegen ungünstiger Eigenschaften dieses Gefüges unerwünscht.

Beim *Sintern* wird der Werkstoffzusammenhalt von Metallpulverkörnern durch Kaltpressen unter Drücken von 200 MPa bis 1000 MPa zu Formteilen und anschließendem eigentlichem Sintern bei Temperaturen zwischen etwa $\frac{2}{3}$ bis $\frac{3}{4}$ ihrer

¹ Die höhere Festigkeit von Kokillenguß ist zum Teil auf die wegen der besonders schnellen Abkühlung verstärkte Neigung zur Ausbildung übersättigter Mischkristalle zurückzuführen.

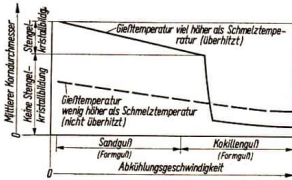


Bild 5.20. Einfluß von Abkühlgeschwindigkeit und Gießtemperatur auf die Gefügeausbildung von Gußstücken (schematisch)

Schmelztemperatur in K ($0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$ und $273\text{ K} = 0^\circ\text{C}$) geschaffen. Beim Pressen wird schon ein gewisser Werkstoffzusammenhalt erzielt, ähnlich wie bei der Kaltpreßschweißung, bei der blanke Metallteile durch starkes Aufeinanderpressen bei Raumtemperatur verschweißt werden. Die mechanisch feste Verbindung der Pulverkörner miteinander erfolgt beim Sintern durch Diffusionsvorgänge, bei denen die Oberflächenatome benachbarter Pulverkörner miteinander in Wechselwirkung treten. Es entstehen porige Körper, die z. B. für Gleitlager wegen ihrer Schmierstoff-

aufnahmefähigkeit sehr geeignet sind. Manche metallischen Werkstoffe lassen sich nur auf diesem Wege verarbeiten.

Umformverfahren. Unter dem Begriff Umformen faßt man nach TGL 21 639 Fertigungsverfahren zusammen, bei denen feste Körper so in andere Formen gebracht werden, daß ihre Masse und ihr Zusammenhalt erhalten bleiben.

Eine für technische Zwecke brauchbare Übersicht über das Verformungsverhalten eines Werkstoffes bei Raumtemperatur liefert das im Zugversuch (vgl. Abschnitt 5.3.2.1.) erhaltene Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

In seiner allgemeinsten Form hat es die in Bild 5.21. gezeigte Ausbildung.

Dabei ist eine Kurve für den Verlauf der auf den Ausgangsquerschnitt der Probe bezogenen Spannung (die in der Technik verwendet wird) und eine (gestrichelt) für den Verlauf der auf den jeweils kleinsten Querschnitt bezogenen wahren Spannung gezeichnet worden. Außerdem wurden die Verhältnisse bei einer Kaltverformung mit angegeben.

Grundsätzlich ist zwischen elastischer und plastischer Verformung zu unterscheiden. Bei elastischer Verformung geht die Dehnung des Probestabes nach Wegnahme der Belastung wieder auf 0 zurück, und das Verhältnis von Spannung zu Dehnung ist im ganzen Bereich kon-

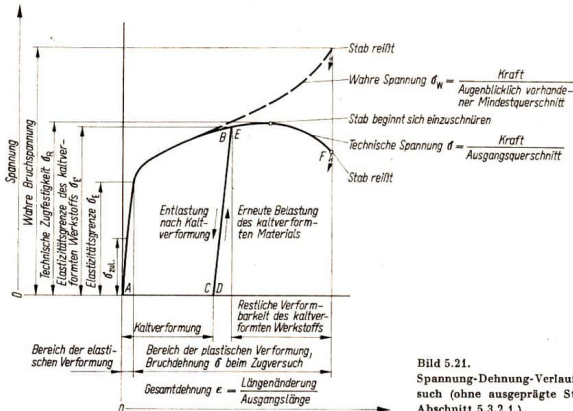


Bild 5.21.

Spannungs-Dehnungs-Verlauf beim Zugversuch (ohne ausgeprägte Streckgrenze, vgl. Abschnitt 5.3.2.1.)



stant ($\sigma/\epsilon = E$; Elastizitätsmodul in GPa, Hookesches Gesetz, s. S. 98). Der elastische Bereich wird bei Konstruktionen ausgenutzt und die zulässige Berechnungsspannung σ_{zul} so gewählt, daß mit Sicherheit die Elastizitätsgrenze σ_E nicht überschritten wird. Nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze verformt sich der Probestab plastisch, wobei die technische Spannung bis zu einem Maximum ansteigt, das als Zugfestigkeit σ_Z bezeichnet wird. Während bis zu diesem Punkt der Stabquerschnitt über die ganze Länge gleichmäßig abnimmt, schnürt sich beim Überschreiten der Zugfestigkeit der Stab an einer beliebigen Stelle ein, wodurch die technische Spannung bei weiterem Dehnungszuwachs wieder abfällt. An der Einschnürstelle tritt schließlich der Bruch ein. Die wahre Spannung nimmt bis zum Bruch zu. Während die Zugfestigkeit ein Maß für die Werkstofffestigkeit ist, ist es die Bruchdehnung δ für die Verformbarkeit. Bei einer Kaltverformung wird nun beispielsweise auf der technischen Spannung-Dehnung-Kurve der Abschnitt A \rightarrow B durchlaufen; beim Entlasten geht der elastische Anteil der Gesamtdehnung wieder zurück (Kurvenabschnitt B \rightarrow C), es hat somit eine Kaltverformung um den Betrag A C stattgefunden. Bei einer neuen Belastung des so kaltverformten Werkstoffes verläuft die technische Spannungskurve von D nach E (in diesem Bereich erfolgt wieder elastische Verformung), wobei im Punkt E wieder die Spannung-Dehnung-Kurve des vorher nicht verformten Werkstoffes erreicht wird, die von A über B,

E nach F läuft. Der kaltverformte Werkstoff hat nun eine Erhöhung seiner Elastizitätsgrenze von σ_E auf σ_E' und eine Verminderung seiner plastischen Verformbarkeit durch die Kaltverformung erfahren. Erfolgt nun die Kaltverformung nicht im Zugversuch, sondern durch Fertigungsverfahren, bei denen eine örtliche Einschnürung unmöglich ist (z. B. durch Kaltwalzen), dann erfolgt infolge des Anstieges der wahren Spannung-Dehnung-Kurve bis zum Bruch auch eine Erhöhung der an diesem Material gemessenen Zugfestigkeit (vgl. Übersicht 5.22.).

Elastische und plastische Verformung lassen sich folgendermaßen einfach demonstrieren: Man spannt einen Blechstreifen von etwa 1 mm Dicke, 15 mm Breite und 200 mm Länge einseitig in einen Schraubstock ein. Beim Biegen dieses Streifens von Hand tritt auf einer Flachseite Zug- und auf der anderen Druckbeanspruchung auf. Im elastischen Verformungsbereich federt der Streifen nach Auslenkung wieder in seine alte Stellung zurück, im plastischen tritt eine bleibende Formänderung (Verbiegen) des Streifens ein.

Wird ein *kaltverformtes* Metall, z. B. Stahl, erwärmt, dann laufen in ihm Vorgänge ab, die zu einer Veränderung seiner Eigenschaften führen. In Bild 5.23. ist dies am Beispiel eines unlegierten Stahls demonstriert.

Hiernach sind folgende 4 Temperaturbereiche zu beobachten:

- Bereich I Keine Änderung der Eigenschaften des kaltverformten Materials.
- Bereich II Zugfestigkeit fällt und Bruchdehnung steigt etwas. Die bei der Verformung selbst längs gestreckten Kristallite ändern ihre Gestalt noch nicht. Dieser Vorgang wird als Kristallerholung bezeichnet.
- Bereich III Zugfestigkeit fällt und Bruchdehnung steigt sehr stark. Die Kristallite des Metalls bilden sich völlig um, ihre Korngröße hängt von den Versuchs- bzw. den Verarbeitungsbedingungen ab. Die Erscheinung wird als primäre Rekristallisation bezeichnet, die Temperatur, bei der zum ersten Male die Gefügeumbildung beginnt, als Rekristallisationstemperatur T_R . Bei reinen Metallen ist $T_R \approx 0,4$ Schmelztemperatur, beide gemessen in Kelvin. Daraus ergibt sich, daß reine Metalle mit niedrigen Schmelzpunkten wie Blei, Zinn, Zink schon bei Raumtemperatur rekristallisieren und wegen der damit verbundenen fortlaufenden Entfestigung nicht in dieser Form langfristig belastet werden können. Legierungen mit Mischkristallbildung haben höhere Rekristallisationstemperaturen. So erhöht sich z. B. T_R von $\approx 550^\circ\text{C}$ bei einem unlegierten Stahl auf $\approx 800^\circ\text{C}$ bei einem hochlegierten hochwarmfesten Stahl. Die Rekristallisationstemperatur wird zur Grenze der Bereiche von Kaltverformung und Warmverformung des betreffenden Materials.

Querschnitts- abnahme in %	σ_E in MPa	σ_Z in MPa	δ in %
0	260	370	30
20	370	530	10
40	420	600	5
60	440	640	4

Übersicht 5.22.: Änderung der mechanischen Eigenschaften eines unlegierten Stahls durch Kaltverformung [1]

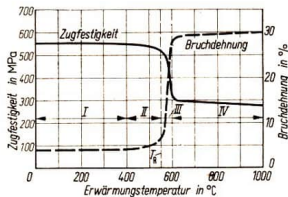


Bild 5.23. Änderung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung eines um 60 % verformten unlegierten und alterungsbeständigen Stahls beim Erwärmen (vgl. [1]), Prüfung bei Raumtemperatur (s. S. 153)



Bereich IV Hier ändern sich Zugfestigkeit und Bruchdehnung nur noch wenig. Es erfolgt eine Vergrößerung der durch die primäre Rekristallisation entstandenen Kristallite, der Vorgang wird als sekundäre oder Sammelkristallisation bezeichnet.

Praktisch wird Rekristallisationsglühen zwischen einzelne Kaltverformungsvorgänge eingeschoben, um jedes Mal die Verformungsfähigkeit des unverformten Zustandes wiederherzustellen.

Die Entfestigung beim Erhitzen eines kaltverfestigten Metalls kann folgendermaßen demonstriert werden: Man nimmt hartgewalztes Blech aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung (Al Mg 3 F 26 oder Al Mg 5 F 32), das sich in diesem Zustand nicht im Schraubstock abkanten läßt. Nun erwärmt man es über einem Gasbrenner so lange, bis auf der der Flamme abgewandten Seite ein Hammerstiel (Hartholz) einen schwarzen Strich zieht (etwa 350 °C). Nach dem Abkühlen ist das Blech gut plastisch verformbar und läßt sich leicht abkanten.

Warmverformen erfolgt oberhalb der Rekristallisationstemperatur des betreffenden Werkstoffes. Durch die gleich im Anschluß an die Verformung erfolgende Rekristallisation ist das Metall im Zustand größter Bildsamkeit und läßt sich in beliebige Form bringen, falls seine Abmessungen nicht zu klein werden und somit eine zu rasche Abkühlung erfolgt. Der hohe Verformungsgrad und die Rekristallisation bewirken ein wesentlich feinkörnigeres Gefüge als bei gegossenem Material. Praktisch wird die Warmverformung z. B. durch Warmwalzen, Freiformschmieden, Gesenkschmieden und Strangpressen vorgenommen.

5.1.1.6. Korrosion und Oberflächenschutz metallischer Werkstoffe

Grundlagen. Als Korrosion bezeichnet man eine von der Oberfläche des Werkstoffes ausgehende Zerstörung eines Metalls durch chemische oder elektrochemische Reaktion mit seiner Umgebung, welche unbeabsichtigt erfolgt. Nach der bisher gebräuchlichen Unterteilung in chemische und elektrochemische Korrosion versteht man unter chemischer Korrosion die in Abwesenheit eines flüssigen Elektrolyten verlaufende Zerstörung (z. B. das Zünden des Eisens beim Glühen) und unter elektrochemischer Korrosion die bei Anwesenheit eines flüssigen Elektrolyten verlaufenden Vorgänge (z. B. das Rosten des Eisens bei

Feuchtigkeitszutritt). Die prinzipielle Ursache jeder Korrosion ist das Bestreben des Metalls, in eine thermodynamisch stabilere chemische Verbindung überzugehen. Je höher der für die Herstellung aus dem Erz erforderliche Energieaufwand ist, desto größer ist die Korrosionsneigung und desto unedler (negativer) ist auch das Metall in der Spannungsreihe (Übersicht 5.25., Seite 131).

Taucht man zwei verschiedene Metalle in einen Elektrolyten, wie Meerwasser, und verbindet sie über einen Draht und einen Strommesser, so fließt ein elektrischer Strom (vom Strommesser angezeigt) vom unedleren zum edleren Metall. Dabei geht das unedlere Metall (Anode) in Form von positiven Metallionen in Lösung (Minuspol). Die in der Anode dadurch frei werdenden negativen Elektronen wandern durch den Draht zur Kathode (Pluspol). Die Polbezeichnung ist umgekehrt wie in der Elektrotechnik gebräuchlich. Statt des einen Elektrolyten läßt sich auch für Kathode und Anode ein gesonderter Elektrolyt verwenden, wenn zwischen beiden eine Mischung verhindernde, aber elektrisch leitende poröse Wand angeordnet wird (Bild 5.24.). Dieses galvanische Element ist jetzt aus zwei sogenannten Halbelementen zusammengesetzt, deren Spannung als sogenanntes Potential stromlos mit einem hochohmigen Spannungsmesser gemessen werden kann. Die in Übersicht 5.25. wiedergegebene Spannungsreihe wird gemessen, wenn das eine Halbelement aus dem betreffenden

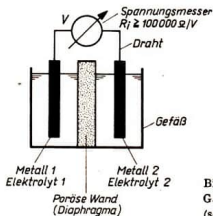


Bild 5.24.
Galvanisches Element
(schematisch)



Metall	E_H^1 in mV	Metall	E_H^1 in mV
Gold	(+ 243)	Zinn	— 184
Silber	+ 149	Blei	— 259
Nickel	+ 46	Chromüberzug	
		50 μ m auf Stahl	— 291
Sondermessing CuZn28Sn	+ 28	Unlegierter Stahl	
		St42u-2	— 335
Messing CuZn37	+ 13	Grauguß GGL-22	
		mit Gußhaut	— 347
Kupfer	+ 10	Cadmium	— 519
X10 CrNi 18.10, passiv ²	— 45	Aluminium	— 667
Titan	— 111	Zink	— 806
X22 CrNi 17, passiv ³	— 134	Magnesium-Aluminium-	
		Legierung	— 1 355

¹ Ruhepotential gegen Normal-Wasserstoffelektrode

² 18/10 Cr-Ni-Stahl

³ 17/1 Cr-Ni-Stahl

Übersicht 5.25.: Praktische Spannungsreihe gebräuchlicher metallischer Werkstoffe in luftgesättigtem künstlichem Meerwasser (TGL 18753) nach J. Elze und G. Oelsner (vgl. [2])

Metall in Meerwasser und das andere aus mit Wasserstoff bedecktem Platin in H_2SO_4 mit einer Wasserstoffionenkonzentration von 1 g/l als Elektrolyt (Normalwasserstoffelektrode) besteht. Bei der vielfach angegebenen Normalspannungsreihe ergeben sich etwas andere Spannungswerte und Verschiebungen bezüglich der Stellung der einzelnen Metalle. Statt des künstlichen Meerwassers wird eine 1-normale Lösung eines Salzes des betreffenden Metalls als Elektrolyt verwendet. Das Potential der Bezugselektrode wird willkürlich = 0 gesetzt. Für praktische Messungen werden einfacher verwendbare Halbelemente wie die $Cu/CuSO_4$ -Elektrode (Bild 5.26.) oder die gesättigte Kalomelektrode genommen, deren Potentiale um einen konstanten Betrag von der Wasserstoffelektrode abweichen (vgl. Bild 5.28.).

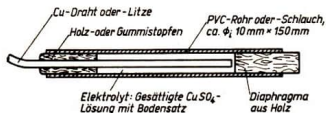


Bild 5.26. Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode

Die im Bild 5.26. dargestellte $Cu/CuSO_4$ -Elektrode kann man sich leicht selbst herstellen. Wichtig ist, daß mit dem Messen frühestens 12 Stunden nach der Anfertigung begonnen werden darf, damit das Diaphragma durchfeuchtet. Für Messungen des Ruhepotentials ist zu beachten, daß in den ersten Stunden nach Eintauchen der Elektrode noch Potentialabsenkungen des Prüfwerkstoffs stattfinden, die erst nach einem Tag abklingen und daß auch Belüftung und Wasserbewegung den Meßwert beeinflussen.

Die Entstehung eines Korrosionsstroms und damit einer Metallauflösung in einem Elektrolyt ist nicht an das Vorhandensein zweier leitend miteinander verbundener Metalle geknüpft. Es bilden sich vielmehr auch auf einer scheinbar homogenen Eisenplatte sogenannte Lokalelemente in großer Anzahl aus, die auf kleinstem Raum Anode und Katode enthalten.

Bei den meisten praktisch vorkommenden Korrosionsfällen wird der sogenannte Sauerstoffkorrosionstyp beobachtet (z. B. bei Eisen und Zink in neutralen, schwach sauren und schwach alkalischen Lösungen, wie Meerwasser, Gebrauchswasser, Flußwasser und Regenwasser): Die Geschwindigkeit der Korrosion ist abhängig von der an die Katode herandiffundierenden Sauerstoffmenge, wobei die in Bild 5.27. einge-

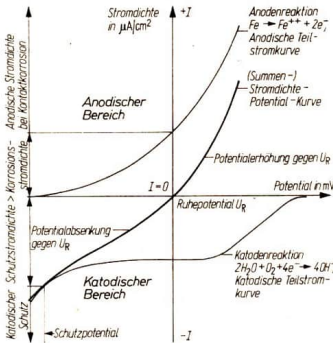


Bild 5.27. Schematische Stromdichte-Potential-Kurve für die Sauerstoffkorrosion des Eisens; Verstärkung der Korrosion bei Potentialerhöhung (Kontaktkorrosion) und Reduzierung bei Potentialabsenkung (Katod. Schutz)

tragenen Reaktionen an Anode und Katode ablaufen.

Ohne äußeren Stromfluß nimmt eine Eisenplatte ihr Ruhepotential in einer wäßrigen Lösung ein. Fließt aber durch die Metalloberfläche ein elektrischer Strom, dann verschiebt sich das Potential entsprechend der Stromdichte-Potential-Kurve (Polarisation), wobei die anodische und die katodische Teilreaktion je nach Verschiebungsrichtung verändert werden. Die Stromdichte-Potential-Kurve setzt sich geometrisch aus der Summe des anodischen und des katodischen Teilvorgangs zusammen. Wird das Potential des Eisens angehoben, wird seine Korrosion verstärkt. Praktisch geschieht das, wenn es elektrisch leitend mit dem edleren Kupfer verbunden wird (Kontaktkorrosion). Wird dagegen das Potential abgesenkt, dann kommt die Anodenreaktion zum Erliegen, und die Korrosion unterbleibt (katodischer Schutz). Praktisch kann das durch Anlegen eines Gleichstroms aus einer Batterie (Fremdstromschutz) oder durch Anbringen von Opferanoden aus unedleren Metallen (Reinstzink sowie Aluminium- oder Magnesium-Speziallegierungen)

gen) realisiert werden. Stahl muß zum katodischen Schutz in Meerwasser auf -850 bis -950 mV gegen die Cu/CuSO_4 -Elektrode polarisiert werden. Wird das Potential zu weit abgesenkt, dann nimmt der Strombedarf sehr stark zu, und es wird H_2 abgeschieden. In Bild 5.28. ist der katodische Ast der Stromdichte-Potential-Kurven für Stahl und eine Kupferlegierung dargestellt, wobei neben der sehr unterschiedlichen Lage auf Grund des unterschiedlichen Verhaltens auch die unterhalb etwa -1000 mV stark ansteigende Stromdichte infolge Wasserstoffabscheidung erkennbar ist.

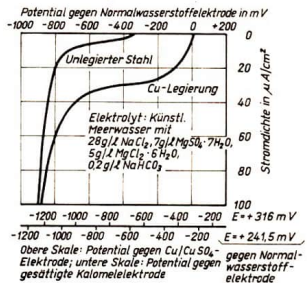


Bild 5.28. Katodischer Ast der Stromdichte-Potential-Kurven einer Kupferlegierung und eines unlegierten Stahls in künstlichem Seewasser nach TGL 18753 (pH ≈ 8 mit NaHCO_3 eingestellt)

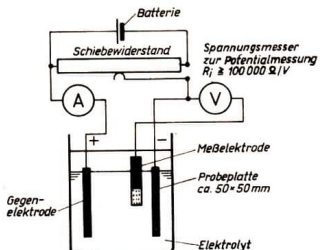
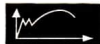


Bild 5.29. Einfache Meßanordnung zur Aufnahme der Stromdichte-Potential-Kurve (galvanostatisch)



Mit der in Bild 5.29. skizzierten einfachen Meßanordnung läßt sich die Stromdichte-Potential-Kurve messen; eine große Genauigkeit darf nicht erwartet werden. Sie ist nur mit Spezialgeräten (Potentiostaten) erreichbar. Praktisch fängt man bei -1100 bis -1200 mV (Cu/CuSO₄-Elektrode) an und verändert das Potential in Stufen von 50 bis 100 mV bis zum anodischen Bereich. Mit zunehmender Polarisierungsdauer verringert sich die Stromdichte im katodischen Bereich, da sich auf der Probe Karbonatdeckschichten aus dem Meerwasser abscheiden. Für die Messung der Stromdichte-Potential-Kurve kann man gegebenenfalls dasselbe Material wie für die Probe als Gegenelektrode nehmen (die Abmessungen sind dann etwa gleich zu wählen). Wird die Anordnung zur Demonstration des katodischen Schutzes genommen, dann sollte für die Gegenelektrode ein Platindraht oder zumindest ein Graphitstab verwendet werden, um eine vorzeitige Zerstörung der Elektrode zu vermeiden. In der Praxis, z. B. für Schiffe, werden plattinierte Titanelektroden oder Elektroden aus einer Blei-Silber-Legierung eingesetzt.

Der Metallverlust bei der elektrochemischen Korrosion ist nach dem Faradayschen Gesetz der Korrosionsstrommenge proportional:

$$\Delta M = \frac{t \cdot m_A}{F \cdot n} \cdot I$$

(ΔM = Masseverlust in g, t = Korrosionszeit in s, m_A = Atommasse in ag, F = Faradaysche Konstante = $9,64870 \cdot 10^4$ A · s · mol⁻¹, n = Wertigkeit der entstehenden Metallionen, I = Korrosionsstrom in A).

Zu Beginn eines Korrosionsvorganges erfolgt häufig ein besonders großer Metallabtrag. Im Laufe der Zeit bedeckt sich die Oberfläche dann mit Korrosionsprodukten und katodischen Ablagerungen, wodurch der Sauerstoffzutritt gehemmt und der Korrosionsangriff verringert wird. Beispiele dafür zeigen die Bilder 5.37.b und 5.37.c. Analog dazu verändert sich die Korrosionsstromdichte. Bei der Korrosion von unlegiertem Stahl in Meerwasser wird deshalb zu Beginn eine Schutzstromdichte von ca. $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ benötigt, um den Korrosionsstrom durch katodischen Schutz zu kompensieren (vgl. Bild 5.27). Im Laufe der Zeit erniedrigt sich der Schutzstrom bis auf $35 \text{ mA}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

Bei der Kontaktkorrosion spielt das Flächenverhältnis von Anode und Katode eine bedeutsame Rolle. Eine im Verhältnis zur

Katodenfläche kleine Anodenfläche erleidet deshalb eine verstärkte Korrosion, weil bei konstanter Stromstärke des Elements die anodische Teilstromdichte besonders hoch und damit die Anodenreaktion entsprechend groß wird (Bild 5.27.). Bei kontaktkorrosionsgefährdeten Konstruktionen muß daher das Verhältnis von Anodenfläche (Oberfläche des unedleren Metalls) zur Katodenfläche (Oberfläche des edleren Metalls) möglichst groß gehalten werden.

Viele technisch wichtige Metalle wie Aluminium und rostbeständige Stähle überziehen sich mit einer elektrochemisch edleren Oxidschicht und verhalten sich dadurch praktisch besser, als auf Grund ihrer Stellung in der Spannungsreihe zu erwarten gewesen wäre. Diese Erscheinung wird als Passivierung bezeichnet (vgl. [5], [7]).

Eintritt und Erscheinungsformen der Korrosion. In vielen Fällen vermag allein die Luftfeuchtigkeit den Elektrolyten für die elektrochemische Korrosion zu liefern, indem sich aus ihr etwas Wasser an der Metalloberfläche niederschlägt. In völlig trockener Luft rostet kein Eisen; die Grenze, oberhalb derer Korrosion einsetzt, liegt bei etwa 70% relativer Luftfeuchtigkeit. Die hauptsächlichsten Erscheinungsformen der Korrosion sind in Bild 5.30. zusammengestellt.

Die ebenmäßige Korrosion ist durch einen Dickenzuschlag zu kompensieren und deswegen relativ ungefährlich. Lochfraß kann

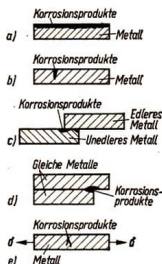


Bild 5.30.
Erscheinungsformen der Korrosion:
a) ebenmäßige Korrosion;
b) Lochfraß;
c) Kontaktkorrosion;
d) Spaltkorrosion;
e) Spannungskorrosion



innerhalb kurzer Zeit zum Durchlöchern des Materials führen und ist somit gefährlich. Kontaktkorrosion tritt bei Feuchtigkeit Zutritt an den Verbindungsstellen von zwei unterschiedlich edlen Metallen auf. In engen Spalten tritt häufig verstärkte Korrosion (Spaltkorrosion) auf, was einmal durch Feuchtigkeitssammlung und zum anderen durch Zerstörung der Passivierungsschichten (besonders bei rostbeständigen Stählen) bewirkt werden kann. Die gefährlichste Erscheinungsform der Korrosion ist die Spannungskorrosion, bei der das Metall unter einer statischen Zugspannung und Angriff eines Elektrolyten durchreißt. In der Regel ist vor Eintritt des Bruches am Bauteil kein Schaden zu erkennen. Bekannt ist die Spannungs-korrosionsanfälligkeit von Messingen (Kupfer-Zink-Legierungen) bei Einwirkung von Ammoniak.

Oberflächenschutz. Grundsätzlich läßt sich auf verschiedene Weise ein Korrosionsangriff verhindern oder herabsetzen, und zwar durch

1. Wahl eines unter den gegebenen Bedingungen beständigen Metalls. Aus preislichen und Rohstoffgründen ist dies nur für hochbeanspruchte Teile wirtschaftlich;
2. Fernhaltung des Elektrolyten durch Farbüberzüge, metallische Überzüge und Fettschichten. Besonders bei Verbindungsstellen von Metallen mit unterschiedlicher Stellung in der Spannungsreihe muß hierauf zur Vermeidung von Kontaktkorrosion geachtet werden (z.B. sorgfältiges Einfetten von Kupfer-Aluminium-Klemmstellen in elektrischen Anlagen);
3. Aufbereitung des Korrosionsmittels (oder Elektrolyten) in der Weise, daß kein Angriff mehr erfolgt. Dies geht nur, wenn das Korrosionsmittel nicht in zu großer Menge und im geschlossenen Kreislauf vorliegt, wie es bei Dampfanlagen der Fall ist;
4. Eine weitere Möglichkeit des Schutzes ist der Katodenschutz mit oder ohne

Fremdstrom bei vollgetauchten Oberflächen in Wässern mit ausreichender elektrischer Leitfähigkeit.

Werden metallische Überzüge aus unedleren Metallen, z. B. wieder Zink auf Eisen, als Korrosionsschutz verwendet, dann findet bei einer örtlichen Abtragung des Überzuges – etwa durch mechanischen Abrieb – ebenfalls Katodenschutz des Grundmetalls statt.

5.1.2. Eisenwerkstoffe

5.1.2.1. Zur Gewinnung der Eisenwerkstoffe

Aus den Eisenerzen wird im Hochofen flüssiges Roheisen durch Reduktion mit Kohlenstoff in Form von Koks hergestellt. Es enthält neben Eisen 3,0 % bis 4,0 % C, 0,5 % bis 1,5 % Mn, 0,3 % bis 3,0 % Si, 0,1 % bis 2,2 % P und weniger als 0,1 % S und ist nicht schmelzbar.

Schmelzbares Eisen wird als Stahl bezeichnet und hat Kohlenstoffgehalte unter etwa 1,5 %. Stahl wird durch Entfernung der Beimengungen des Roheisens (hauptsächlich C, Si, P) erhalten. Diese werden dabei oxidiert und schwimmen als Schlacke auf der Schmelze (Frischen). Der Stahl fällt flüssig an (Flußstahl).

Folgende Hauptverfahren sind im Gebrauch:

1. Windfrischverfahren (Thomas- und Bessemerverfahren).

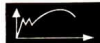
Durch das flüssig in sogenannte Konverter eingebrachte Roheisenbad wird Luft hindurchgeblasen und dadurch die genannten Beimengungen verbrannt (oxidiert). Infolge der Luftzusammensetzung aus $\frac{4}{5}$ Stickstoff und $\frac{1}{5}$ Sauerstoff ist der Stickstoffgehalt dieser Stähle relativ hoch. Dieser hohe Stickstoffgehalt wird durch Verwendung von Sauerstoff zum Frischen in Spezialverfahren, wie z. B. LD-Verfahren (Linz-Donawitz), vermieden. Die Verfahren dienen zur Herstellung unlegierter Massenstähle. LD-Stähle sind Siemens-Martin-Stählen gleichwertig.

2. Herdfrischverfahren (Siemens-Martin-Verfahren).

Das Frischen erfolgt hier bei sehr hohen Temperaturen durch Luft in den über die Schmelze streichenden Heizgasen und durch Zusatz von hochwertigen Eisenerzen. Im Gegensatz zu den Windfrischverfahren kann auch Schrott verarbeitet werden. Man erhält stickstoffarme Stähle, und zwar werden im Siemens-Martin-Ofen unlegierte und niedriglegierte Stähle erschmolzen.

3. Elektrostahlverfahren (Lichtbogenofen nach Héroult, Induktionsofen).

Beim Lichtbogenofen brennt ein Lichtbogen über dem Schmelzbad und dient als Wärmespeicher, beim Induktionsofen werden durch eine um den Schmelztiegel gelegte, von Wechselstrom durchflossene Spule in der Schmelze Wirbelströme induziert, die in Wärme umsetzen. Die Verfahren dienen der Herstellung von



unlegierten und legierten Edelmässen, die sich durch besondere Reinheit und genaue Einhaltung einer bestimmten Zusammensetzung auszeichnen.

Bei der Stahlherstellung ist noch auf die Vergießungsart zu achten. Beim Abgießen des flüssigen Stahls erfolgt die Erstarrung in der Kokille ruhig, wenn unmittelbar vor dem Vergießen 0,15% bis 0,45% Si und bzw. oder $> 0,02\%$ Al zugefügt werden. Beide Elemente binden den in der Schmelze vorhandenen Sauerstoff (Desoxydation), Aluminium bindet auch den Stickstoff im Stahl. Der Gußblock für die Weiterverarbeitung im Walzwerk enthält in seinem oberen Teil einen großen Hohlraum (Lunker), der abgeschnitten werden muß. Derartig vergossener Stahl wird als beruhigter Stahl bezeichnet. Unberuhigt vergossener Stahl erhält außer dem obligatorischen Manganzusatz keine weiteren Desoxydationsmittel und enthält deswegen noch eine gewisse Menge Sauerstoff an Kohlenstoff als Kohlenmonoxid gebunden. Dieses Gas entweicht bei der Erstarrung, die dadurch unruhig ist (unberuhigter Stahl). Unberuhigter Stahl hat keinen Kopflunker, dafür aber eine Seigerungszone (Anreicherung von C, P und S) im Kern, die sich auch beim Walzmaterial nachweisen läßt (Bild 5.31.).

Die Seigerungsstellen können an einem grobgeschliffenen Querschnitt durch das Halbzug leicht mit Hilfe des sogenannten Baumann-Abdruckes nachgewiesen werden. Hierzu wird Fotopapier bei Tageslicht mit 5%iger Schwefelsäure getränkt und der Schliff einige Zeit auf die Schichtseite gedrückt. Es wird normal fixiert, gewässert und getrocknet, und man erhält ein Bild wie Bild 5.3.1., wobei die Schwefelseigerungen schwarzbraun erscheinen.

Stähle mit mehr als etwa 0,25% C können nur noch beruhigt vergossen werden. Beruhigter Stahl ist zäher (vgl. Abschnitt 5.1.2.3.) und teurer.



Bild 5.31.
Seigerungszone
bei Halbzeug aus
unberuhigtem
Stahl
(schematisch).
a) Knüppel;
b) Winkel

5.1.2.2. Eisen-Kohlenstoff-Legierungen und ihr Umwandlungsverhalten

Kohlenstoff ist das wichtigste Legierungselement des Eisens. Einen ersten Anhalt darüber gibt das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff, welches für außerordentlich geringe Abkühlungs- und Erwärmungsgeschwindigkeiten und für reinste Eisen-Kohlenstoff-Legierungen Gültigkeit besitzt. Beide Fälle liegen bei technischen Stählen und ihrer Wärmebehandlung nicht vor.

In der Regel wird ein Doppelschaubild angegeben, dessen voll ausgezogene Linien für das Teildiagramm Fe-Fe₃C (Fe₃C ist ein intermetallische Phase) und die gestrichelten für das Teildiagramm Fe-C (Graphit) gelten. Die Gefügebezeichnungen beziehen sich auf das praktisch wichtigere System Fe-Fe₃C. Bild 5.32. zeigt das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild. Gleichzeitig sind die Konzentrationsbereiche der Stähle und des Gußeisens mit eingetragen worden. Übersicht 5.33., Seite 136, gibt die wichtigsten Gefüge- und Phasenbezeichnungen und die Bezeichnungen der Umwandlungspunkte an.

Hierzu ist ergänzend anzuführen, daß Zementit als Primär- und Sekundärzementit im Fe-Fe₃C-Diagramm auftritt. Dabei entsteht Primärzementit durch Kristallisation aus der Schmelze (Linie CD) und Sekundärzementit durch Ausscheidung aus dem Austenit (Linie ES). Ein Eutektoid (hier als Perlit bezeichnet) unterscheidet sich

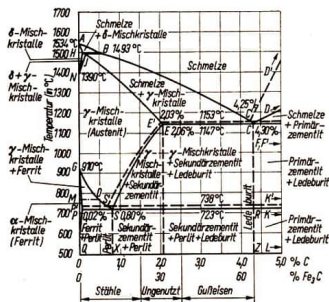


Bild 5.32. Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (nach [3])



Allgemeine metallographische Bezeichnung	Sondername	Kennbuchstabe für die Umwandlungstemperatur
α -Eisen (Mischkristalle)	Ferrit	—
γ -Eisen (Mischkristalle)	Austenit	—
Eutektoid	Perlit	—
Umwandlung Perlit \rightleftharpoons Austenit	—	A ₁ (Ac ₁ Erhitzung, Ar ₁ Abkühlung) Linie PSk im Fe-Fe ₃ C-Diagramm
Umwandlung $\alpha \rightleftharpoons \beta$	—	A ₂ (Ac ₂ Erhitzung, Ar ₂ Abkühlung) Linie MO im Fe-Fe ₃ C-Diagramm
Umwandlung α oder $\beta (+ \gamma) \rightleftharpoons \gamma$	—	A ₃ (Ac ₃ Erhitzung, Ar ₃ Abkühlung) Linie GOS im Fe-Fe ₃ C-Diagramm
Eutektikum	Ledeburit	—
Umwandlung $\gamma \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{C} + \gamma$	—	Am (Ac _m Erhitzung, Ar _m Abkühlung) Linie SE im Fe-Fe ₃ C-Diagramm
Intermetallische Phase Fe ₃ C	Zementit	—

Übersicht 5.33.: Bezeichnungen wichtiger Gefügebestandteile, Phasen und Umwandlungspunkte im Fe-Fe₃C-Diagramm (vgl. Bilder 5.32. und 5.11.)

von einem Eutektikum dadurch, daß es im Diagramm unter einer Mischkristallphase anstatt unter einer Schmelze liegt.

Das System Fe-Fe₃C wird in der Regel bei den reinen Kohlenstoffstählen erhalten. Bei längerem Glühen bei erhöhten Temperaturen zerfällt Fe₃C vorwiegend in kohlenstoffreichen Legierungen in Fe und C. Auch nach extrem langsamem Abkühlen erfolgt bei kohlenstoffreichen Legierungen die Erstarrung nach dem System Fe-C. Man bezeichnet deshalb das System Fe-Fe₃C als metastabil (weniger stabil) und das System Fe-C als stabil. Weitere Legierungselemente außer Kohlenstoff beeinflussen die Art der Erstarrung. So begünstigen Mn-Zusätze die Erstarrung nach dem metastabilen und Si-Zusätze die Erstarrung nach dem stabilen System. Für Stähle gilt das metastabile System.

Das aus Ferrit und Perlit bestehende Gefüge eines Stahls mit 0,38 % C zeigt Bild 5.34. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt der Perlitanteil linear von 0 % bei 0 % C (Bild 5.36.) bis auf 100 % beim Perlitpunkt (0,8 % C) zu.

Während bei einem großen Teil der Eisenwerkstoffe nicht genügend Begleitelemente vorhanden sind, um eine erhebliche Verschiebung der Gleichgewichtslinien zu bewirken (man bezeichnet sie deshalb als unlegiert), sind die Einflüsse unterschiedlicher Abkühlungsgeschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigbar. Diese Verhältnisse werden bei den Stählen durch die sogenannten Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder für kontinuierliche Abkühlung dargestellt.

Sie werden erhalten, indem Proben mit unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten von einer Temperatur oberhalb Ac₃ bzw. Ac_m abgekühlt und die Umwandlungstemperaturen gemessen werden. Die Diagramme sind entlang der Abkühlungskurven zu lesen, die Zeitachse beginnt mit dem Durchschreiten der Ac₃-Temperatur beim Abkühlen.

Bild 5.35. zeigt ein derartiges Schaubild. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist logarithmisch aufgetragen, daher verwischen bei den langsamen Abkühlungsgeschwindigkeiten Knick- und Haltepunkte (vgl. Abschnitt 5.1.1.4.).

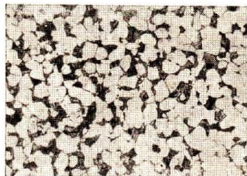


Bild 5.34. Gefüge eines Stahls mit 0,38 % C im normalisierten Zustand. Vergrößerung 200 : 1, geätzt mit alkohol. HNO₃. Heller Gefügebestandteil Ferrit, dunkler Perlit



Abkühlungskurve	Ferrit in %	Bildung beendet bei in °C	Perlit in %	Bildung beendet bei in °C	Zwischen- stufen- gefüge in %	Bildung beendet bei in °C	Martensit in %	Vickers- härte
1	0	—	0	—	2	340	Rest	548
2	1	520	10	485	20	325	Rest	533
3	3	560	20	525	17	310	Rest	318
4	10	615	80	570	5	300	Rest	274
5	25	645	75	625	0	—	0	274
6	30	660	70	640	0	—	0	224
7	50	690	50	650	0	—	0	210
8	60	720	40	675	0	—	0	202

Übersicht zu Bild 5.35.

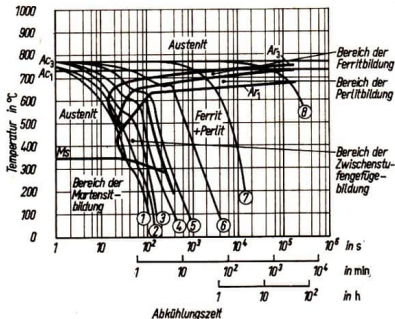


Bild 5.35.
Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild
eines unlegierten Stahls mit 0,44 % C
für kontinuierliche Abkühlung nach
F. Wever, A. Rose und Mitarbeitern [8]

In Auswertung von Bild 5.35. ergibt sich folgendes: Bei sehr langsamer Abkühlung geht $A_{r3} \rightarrow A_{c3}$ und $A_{r1} \rightarrow A_{c1}$. Da nach dem Fe-Fe₃C-Diagramm bei 0,80 % C 100 % Perlit im Gefüge auftreten, müßten bei 0,44 % C etwa 45 % Ferrit und 55 % Perlit im Gefüge gefunden werden. Dies trifft bei den Kurven 7 und 8 annähernd zu. Mit zunehmender Abkühlungsgeschwindigkeit erhöht sich der Perlitanteil auf Kosten des Ferritanteils (Kurven 5 bis 8). In Bild 5.35. ist weiter ein Bereich der Bildung von Zwischenstufengefüge mit eingezeichnet, welches sich bei tieferen Temperaturen und geringeren Abkühlungszeiten als Perlit bildet. Bei noch kürzerer Abkühlungszeit und noch tieferer Temperatur bildet sich aus dem Austenit durch einen Umklappvorgang der außerordentlich harte und spröde Martensit (Härtegefüge). Der Stahl wurde gehärtet.

Um einen Stahl zu härten, muß er zuvor in seinem Austenitgebiet erhitzt (zweck-

mäßigerweise auf Temperaturen von 30 K bis 50 K oberhalb der Linie GOSK im Fe-Fe₃C-Diagramm) werden, wobei der Kohlenstoffgehalt im γ -Mischkristall gelöst wird. Danach wird in Wasser oder Öl abgeschreckt. Entsprechend den im Bild 5.35. wiedergegebenen Verhältnissen benennt man eine sogenannte obere kritische Abkühlungsgeschwindigkeit, oberhalb der nur Martensit gebildet wird, und eine untere, bei der erstmalig Martensit gebildet wird. Zweckmäßigerweise gibt man wegen der sich bei der Abkühlung ändernden Abkühlungsgeschwindigkeit eine Abkühlungszeit von A_{c3} bis 500 °C für beide Größen an.



Bei dem im Bild 5.35. behandelten Stahl beträgt danach die kritische Abkühlungszeit bis 500 °C für ausschließliche Martensitbildung ungefähr 10 Sekunden und die für erstmalige Martensitbildung ungefähr 150 Sekunden. Während man bei derartig niedrigen erforderlichen Abkühlungszeiten zum Härten im Wasser abschrecken muß, werden durch Legierungszusätze die kritischen Abkühlungszeiten so erhöht, daß man nach Öl- oder gegebenenfalls auch nach Luftabkühlung schon ein martensitisches Gefüge erhält. Derartige Stähle reißen dann nicht beim Härten, wie es bei Wasserabschreckung vorkommen kann.

Das Zwischenstufengefüge weist gegenüber dem Martensit zwar geringere Härte, aber dafür eine beträchtliche Zähigkeit auf. Eine Wärmebehandlung zur ausschließlichen Erzielung von Zwischenstufengefüge nennt man Zwischenstufenvergütung; sie ist bei einigen legierten Stählen möglich.

Unter *Normalglühen* von unlegiertem Stahl versteht man ein Glühen bei Temperaturen von 30 K bis 50 K oberhalb der Linie GOSK im Fe-Fe₃C-Diagramm [9] mit nachfolgendem Abkühlen in ruhender Luft. Dem entsprechen die Abkühlungskurven 6 und 7 in Bild 5.35.; man erhält dabei ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit relativ geringer Korngröße.

Die Härte unlegierter Stähle im normalisierten und gehärteten Zustand zeigt in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt Bild 5.36. In diesem Zusammenhang ist die Tatsache interessant, daß die Härte des Martensits auch bei legierten Stählen dieselbe wie bei unlegierten ist. Freilich ist es bei unlegierten Stählen besonders bei niedrigen C-Gehalten schwierig, wegen der hohen kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit technische Querschnitte durchgehend auf 100% Martensit zu bringen. Unterhalb von etwa 0,3% C wird praktisch nicht mehr gehärtet. Wird ein martensitisches Gefüge erwärmt (angelassen), dann beginnt es zu zerfallen, und zwar scheiden sich weit unterhalb des A_{c1}-Punktes fein verteilte Karbide aus (Vergütungsgefüge).

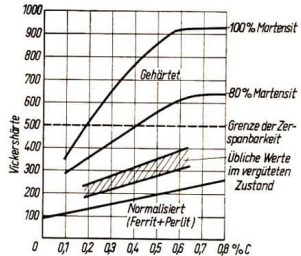


Bild 5.36. Der Einfluß des Kohlenstoffgehaltes auf die Härte von Stahl im normalisierten und gehärteten Zustand (vgl. [9])

Unterhalb 200 °C ist der Härteverlust nur gering. Um ein nachträgliches Reißen durch die hohen, beim Härten im Werkstück entstehenden Spannungen zu vermeiden, werden gehärtete Werkzeuge oft auf 120 °C bis 200 °C angelassen. *Vergüten* wird bei Stählen mit C-Gehalten zwischen 0,2% und 0,6% ausgeführt. Es bewirkt einen hochfesten (vgl. Bild 5.35.) und hochzähnen Werkstoffzustand.

5.1.2.3. Zähigkeitseigenschaften der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

Kohlenstoffstähle verlieren im Bereich von etwa + 40°C bis - 60°C ihre Zähigkeit weitgehend, was ihre Gebrauchseigenschaften sehr beeinträchtigt. Die Temperaturlage dieses Zähigkeitsverlustes ist stark von kleinen Beimengungen, die durch die metallurgische Herstellung eingeschleust werden, abhängig. Der Zähigkeitsverlust kommt im Temperaturverlauf der Kerbschlagzähigkeit (Bild 5.37.a) zum Ausdruck, wobei aber keine Umrechnungsmöglichkeit der Kerbschlagwerte auf das praktische Verhalten des betreffenden Stahles im Bauwerk, z. B. einer Brücke, besteht.

Die Tatsache des Zähigkeitsverlustes an sich liegt im kristallographischen Aufbau des α -Eisens (kubisch-raumzentriertes Gitter, vgl. Abschnitt 5.1.1.2.) begründet. Je

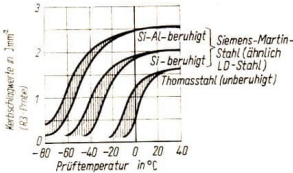


Bild 5.37.a Temperaturverlauf der Kerbschlagzähigkeit bei Kohlenstoffstählen verschiedener Herstellung nach E. Baerlecken und J. Schöffler [9]

niedriger der Übergang zu niedrigen Kerbschlagwerten bezüglich der Temperatur liegt, desto hochwertiger ist der Stahl. Demnach sind Thomasstähle am ungünstigsten und Si-Al-beruhigte Siemens-Martin-Stähle am günstigsten (Bild 5.37.a). Durch verschiedene Vorgänge im Stahl können diese Verhältnisse weiter verschlechtert werden (Verschieben des Steilabfalls nach rechts zu höheren Temperaturen):

1. **Abschreckalterung.** Das ist eine Aushärtung (vgl. Abschnitt 5.1.1.4.), bei der außer einer Härtesteigerung um maximal ungefähr 70 % nach schnellem Abkühlen von Temperaturen um 700 °C eine Verschiebung des Steilabfalls um maximal etwa 40 K nach rechts im Laufe der Zeit erfolgt (bei Raumtemperatur $\approx 1/4$ Jahr). Sie beruht auf der Löslichkeitsdifferenz vor allem des Kohlenstoffs im α -Eisen (723 °C: 0,02 %, 20 °C: 0 %).
2. **Reckalterung.** Diese Aushärtung erfolgt im Laufe der Zeit nach einer Kaltverformung (Recken, Biegen u. ä.) und beruht auf Entmischungsvorgängen von Kohlenstoff und hauptsächlich Stickstoff im kaltverformten Stahl. Die Härte steigt dabei maximal um etwa 15 %, und der Steilabfall der Kerbschlagzähigkeit wird bei 20 °C in etwa einem halben Jahr maximal um 40 K erhöht (bei Thomasstahl).
3. **Martensitbildung.** Eine Martensitbildung führt auch zur Versprödung. Die unter 1. bis 3. beschriebenen Effekte verschlechtern Kerbschlagzähigkeit und Bruchdehnung (und erhöhen die Zugfestigkeit sowie die Streckgrenze).

5.1.2.4. Zur Wirkung von Zusatzelementen auf die Stahleigenschaften

Unlegierten Stählen werden Mangan und mitunter Silizium und Aluminium zur Desoxydation zugefügt (vgl. Abschnitt 5.1.2.1.). Phosphor, Schwefel und Stickstoff sind un-

erwünschte Begleitelemente und werden deshalb in ihren Gehalten möglichst niedrig eingestellt. Eine Abbildung von Stickstoff wird durch Aluminiumzusätze bewirkt, deshalb sind derartig behandelte Stähle (Si-Al-beruhigte Stähle) besonders wenig rekalterungsempfindlich. Die im Stahl feinverteilten Aluminiumnitride bewirken auch eine sehr kleine Korngröße (Feinkornstähle). Deshalb besitzen diese Stähle die besten Zähigkeitseigenschaften unter den unlegierten Stählen (Bild 5.37.a).

Legiert wird, um die Stahleigenschaften dem Verwendungszweck anzupassen. Wichtige Wirkungen sind beispielsweise die Erhöhung der Zugfestigkeit (besonders Kohlenstoff), die Senkung der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeiten beim Härten (Mangan, Chrom, Nickel, Silizium), die Vermeidung gewisser Versprödungserscheinungen beim Vergüten (Molybdän), die Steigerung der Warmhärte (Wolfram) und die Erzielung von Rostbeständigkeit des Stahles (Chrom). Im Rahmen dieses Abschnittes ist es nicht möglich, auf die mannigfaltigen Auswirkungen der Legierungselemente im einzelnen einzugehen. Ausführliche Angaben finden sich bei [1]. Die Massenzähle (allgemeine Baustähle) sind zum überwiegenden Teil unlegiert, lediglich höherfeste und korrosionsträge Stähle werden niedrig legiert hergestellt.

5.1.2.5. Einteilung der Stähle nach ihrem Verwendungszweck

Nach ihrem Verwendungszweck teilt man die Stähle in Gruppen ein, deren wichtigste im folgenden genannt werden:

1. Allgemeine Baustähle
2. Einsatzstähle
3. Vergütungsstähle
4. Warmfeste Stähle
5. Werkzeugstähle
6. Rost- und säurebeständige Stähle

Die *allgemeinen Baustähle* umfassen unlegierte Stähle mit einer gewährleisteten Zugfestigkeit von 320 MPa bis 690 MPa.



Bis zu einer Streckgrenze von 350 MPa (St 52) werden sie für geschweißte Stahlbauten (Hoch-, Brücken-, Schiffbau) verwendet; die Stähle mit noch höherer Zugfestigkeit werden im Maschinenbau eingesetzt. Maßgebend für die Standardisierung (TGL 7960) der schmelzschweißbaren Stähle war ihre Sprödbrechneigung. Darunter versteht man bei geschweißten Bauwerken aufgetretene, von den Schweißnähten ausgegangene, spröde Brüche, die in der Regel bei Temperaturen unter 20°C und oft bei nur geringer Belastung der betreffenden Konstruktionen erfolgten. Maßgebend hierfür sind die Zähigkeitseigenschaften der Stähle. Die obere Streckgrenze von 350 MPa resultiert aus der Gefahr der Martensitbildung beim Schweißen und dem damit verbundenen zusätzlichen Zähigkeitsverlust (vgl. Abschnitt 5.1.2.3.). International wurden auch schweißbare Baustähle mit wesentlich höherer Streckgrenze für Sonderzwecke entwickelt, sie werden stets vergütet.

Als *korrosionsträge Stähle* bezeichnet man niedrig legierte Baustähle, bei denen durch Zulegieren von bis zu 0,130% P, 0,25 bis 0,50% Cu, 0,50 bis 1,00% Cr und bis zu 0,65% Ni (TGL 2892) vor allem bei atmosphärischer Korrosion relativ dichte Rostschichten entstehen und den Korrosionsverlust gegenüber unlegierten Stählen reduzieren (Bild 5.37.b).

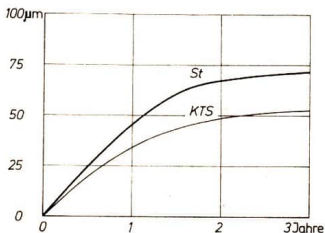


Bild 5.37.b Korrosionsverlust von unlegiertem Baustahl (St) und korrosionsträgem Stahl (KTS) in ländlicher Atmosphäre nach Reuter [11].

Normalerweise werden korrosionsträge Stähle nicht durch Anstriche vor Korrosion geschützt; Rostfärbung der Oberfläche ist für das Aussehen eines aus ihnen hergestellten Stahlbauwerkes typisch. Nicht unter allen Bedingungen sind korrosionsträge Stähle ökonomisch [12], z. B. verhalten sie sich bei Angriff von chloridhaltigen Medien deutlich schlechter als unlegierte Stähle (Bild 5.37.c).

Einsatzstähle werden für Maschinenteile verwendet, die neben einer Schlagunempfindlichkeit eine harte und verschleißfeste Oberfläche benötigen. Dazu werden die kohlenstoffarmen Einsatzstähle ($\leq 0,2\% \text{ C}$) durch *Einsetzen* in kohlenstoffabgebende Medien oberflächlich aufgekühlt und dann die Oberfläche gehärtet; der Kern bleibt wegen seines zu niedrigen Kohlenstoffgehaltes weich und zäh.

Vergütungsstähle werden benutzt, wenn höhere Festigkeiten als die der allgemeinen Baustähle verlangt werden. Sie haben nach dem Vergüten (Härten mit nachfolgendem Anlassen, vgl. Abschnitt 5.1.2.2.) Zugfestigkeiten bis maximal etwa 1420 MPa und eine im Verhältnis zur Zugfestigkeit hohe Streckgrenze (vgl. Abschnitt 5.3.2.1.). Ihr Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 0,3% und 0,6%, und ihre Zähigkeit im ver-

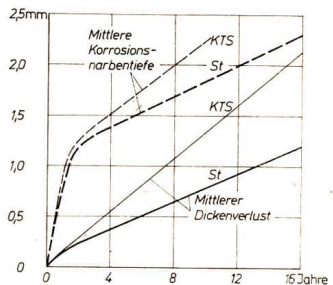
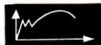


Bild 5.37.c Korrosionsverlust von unlegiertem Baustahl (St) und korrosionsträgem Stahl (KTS) in Meerwasser nach Southwell, Forgeson und Alexander [14].



güteten Zustand ist beträchtlich. **Warmfeste Baustähle** werden für thermisch beanspruchte Teile (z. B. Kessel) verwendet. Bis etwa 350 °C sind unlegierte Stähle brauchbar; bei höheren Temperaturen müssen legierte Stähle mit erhöhten Rekristallisationstemperaturen (vgl. Abschnitt 5.1.1.5.) eingesetzt werden.

Werkzeugstähle dienen zur Formgebung, Trennung und Zerkleinerung der verschiedensten Stoffe. Kennzeichnend ist die hohe Härte und Schneidhaltigkeit im Betrieb, die meistens durch Härten erreicht wird. Es werden unlegierte und legierte Werkzeugstähle verwendet; die letzteren stets dann, wenn die Eigenschaften der billigeren unlegierten Stähle nicht mehr genügen. Wo keine hohen Betriebstemperaturen an der Schneide auftreten, wie bei der Holzbearbeitung, sind unlegierte Stähle mit ihrer im allgemeinen etwas besseren Schneidhaltigkeit einzusetzen. Dagegen sind sie für die Metallbearbeitung weniger geeignet, da sie mit steigender Arbeitstemperatur ihre Härte schneller verlieren (Bild 5.38.).

Man benutzt für die Metallbearbeitung, bei der an der Schneide hohe Temperaturen entstehen (dasselbe gilt für die Plastbearbeitung), hochlegierte **Schnellarbeitsstähle**, die bis zu 20 % Wolfram, daneben noch

Molybdän, Kobalt und Vanadin enthalten. Noch bessere Warmhärte besitzen die gesinterten **Hartmetalle**, die aus Wolframkarbid mit Kobaltzusatz oder aus Wolfram- und Titankarbid und Kobalt bestehen (Warenzeichen Harthü).

Letztere gehören zwar nicht mehr zu den Stählen, werden aber im Hinblick auf ihre Verwendung hier mit behandelt. Neuerdings werden auch keramische Schneidkörper verwendet. Ihre Hauptschwächen liegen aber in ihrer Schlagempfindlichkeit (vgl. Abschnitt 5.2.3.).

Rost- und säurebeständige Stähle enthalten mindestens 13 % Chrom. Bei diesem Gehalt tritt sprunghaft Korrosionsbeständigkeit ein. Dabei ist bei Gehalten zwischen 13 % und 16 % Cr auf eine feinbearbeitete Oberfläche zu achten, bei höheren Chromgehalten beeinflusst die Oberflächengüte die Rostbeständigkeit nicht. Häufig wird Nickel zulegiert.

Ein bekannter Vertreter dieser Gruppe ist der Stahl mit 18 % Cr und 8 % Ni (älterer Firmenname V 2 A). Die Rostbeständigkeit ist von den Angriffsbedingungen abhängig. Sie gilt z. B. nicht für unbelüftetes, unbewegtes Meerwasser.

5.1.2.6. Gegossene Eisenwerkstoffe

Stahlguß. Stahlguß oder Stahlformguß ist in Sandformen zu Fertigteilen vergossener Stahl mit Kohlenstoffgehalten zwischen 0,1 % und 1,2 % (bei unlegierten und niedriglegierten Stählen nicht über 0,6 %). Er erreicht nach Normalglühen annähernd die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften eines gewalzten Stahls gleicher chemischer Zusammensetzung. Unlegierter Stahlguß wird mit gewährleisteten Zugfestigkeiten zwischen 370 MPa und 590 MPa niedriglegierter Stahlguß aus entsprechenden Einsatz-, Vergütungs- und wärmefesten Stählen hergestellt; er erreicht deren Eigenschaften. Hochlegierter Stahlguß wird für rost- und säurebeständige sowie auch hochwärmefeste Gußstücke verwendet. Im Vergleich zum Grauguß ist Stahlguß wesentlich

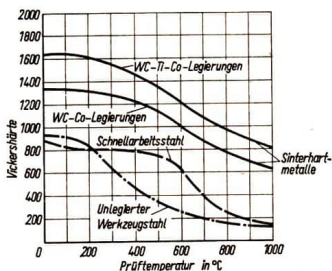


Bild 5.38. Warmhärte verschiedener Schneidwerkstoffe (vgl. [9])



	Weißes Gußeisen	Graues Gußeisen	Gußeisen mit Kugelgraphit
Chemische Zusammensetzung	2,4 % bis 4,0 % C 0,3 % bis 1,5 % Si 0,15 % bis 15 % Mn	2,5 % bis 4,0 % C 0,3 % bis 3,0 % Si 0,3 % bis 1,2 % Mn	etwa 3,5 % C weniger als 0,02 % S
C als	Fe_3C	vorwiegend Graphit in Plättchenform (Graphitlamellen)	Fe_3C und Graphitkugeln
Zustandsdiagramm	Fe- Fe_3C	vorwiegend Fe-C	vorwiegend Fe-C
Bruchaussehen	weiß	grau	grau

Übersicht 5.39.: Einteilung des Gußeisens

fester und zäher, läßt sich aber schlechter vergießen und ist merklich teurer.

Gußeisen. Unter Gußeisen versteht man Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit meist mehr als 2 % Kohlenstoff, die in der Regel nicht oder nur sehr begrenzt umformbar sind (vgl. Abschnitt 5.1.1.5.). Die wichtigsten Gußeisenarten sind in der Übersicht 5.39. zusammengestellt.

Der meist verwendete gegossene Eisenwerkstoff ist *Grauguß* (Mindestzugfestigkeiten zwischen 120 MPa und 290 MPa je nach Sorte). Die im Gußstück an den einzelnen Stellen vorliegenden Festigkeitswerte hängen von der Wanddicke ab, da diese die Gefügeausbildung beeinflusst. Der Einfluß der Abkühlungsgeschwindigkeit und besonders der der beiden Begleitelemente Mangan und Silizium auf die Erstarrungsart der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen wurde bereits im Abschnitt 5.1.2.2. behandelt. Grauguß enthält den Graphit in Form von Plättchen (Lamellen, GGL); Spezialsorten enthalten ihn in Kugelform (GGG). Infolge der Graphitlamellen, die bei Zugbeanspruchung wie eine Werkstofftrennung wirken und an deren Rändern hohe Spannungsspitzen entstehen, folgt der Grauguß bei Zugbeanspruchung im elastischen Verformungsbereich *nicht* dem Hookeschen Gesetz (vgl. Abschnitt 5.1.1.5.) und bricht im Gegensatz zu Stahl spröde ohne plastische Verformung (Bild 5.40.). Seine Druckfestigkeit ist deshalb auch etwa viermal so groß wie seine Zugfestigkeit. Verwendung findet Grauguß für Maschinenteile (z. B. Drehmaschinenbetten, Kolbenringe, Laufbuchsen von Motoren und Verdichtern, Gleitlager).

Weißes Gußeisen besitzt außer einer großen Sprödigkeit eine besonders große Härte (Hartguß), die auf die Erstarrung nach dem Fe- Fe_3C -Diagramm zurückzuführen ist. Es wird vor allem für metallurgische Walzen verwendet.

Temperguß ist ein Gußeisen, das als weißes Gußeisen abgegossen und dann als Fertigteil einer längeren Glühbehandlung (Tempern) unterzogen wurde. Dabei erhält es durch Bildung eines ferritisch-perlitischen Gefüges mit kugelförmigem Graphit (Temperkohle), in besonderen Fällen auch ohne Graphit, eine gewisse Zähigkeit. Verwendet wird Temperguß für Kleinteile wie Schlüssel und Fittings.

5.1.3. Nichteisenmetalle

5.1.3.1. Aluminium und Aluminiumlegierungen

Reinaluminium. Unter Reinaluminium versteht man Aluminium mit mindestens 98 % Al. Es ist sehr bildsam und läßt sich ausgezeichnet kaltverformen. Im weichgeglühten Zustand ist bei Reinstaluminium mit 99,99 % Al die Zugfestigkeit $\sigma_Z \geq 40$ MPa und die Bruchdehnung $\delta \geq 28\%$, im hartgezogenen Zustand $\sigma_Z \geq 100$ MPa und $\delta \geq 4\%$. Die Festigkeit ist selbst im festesten Zustand (hartgezogen) niedrig und Reinaluminium daher nur für mechanisch niedrig beanspruchte Teile verwendbar.

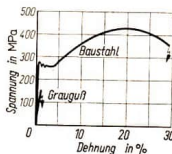


Bild 5.40.
Zerreißschaubilder
für Baustahl
und Grauguß



Verwendet wird Reinaluminium besonders als Leiterwerkstoff (es besitzt etwa 60 % der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit des Kupfers), für Auskleidungen in der chemischen Industrie, Geschirre und Dachbedeckungen.

Eine Abart des Reinaluminiums ist das *Sinteraluminium*, welches aus Aluminiumpulver durch Pressen und Sintern hergestellt wird. Durch die Oxidschichten der einzelnen Pulverpartikel enthält der fertige Werkstoff 10 % bis 15 % Al_2O_3 .

Aluminiumlegierungen. Allgemein unterscheidet man bei den Nichteisenmetallen zwischen Knetlegierungen, die durch Umformen zu Blechen, Profilen, Rohren, Schmiedestücken und dergleichen verarbeitet werden, und Gußlegierungen (für Formguß).

Für die Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften der Aluminiumlegierungen ist es von ausschlaggebender Bedeutung, ob Aushärtbarkeit vorliegt oder nicht. Die Übersicht 5.42. gibt darüber Auskunft.

Die nicht aushärtbaren Knetlegierungen können durch Kaltverformung verfestigt werden und sind deshalb auch in verschiedenen Verfestigungsstufen auf dem Markt. (Allgemein wird die Mindestzugfestigkeit in kp/mm^2 hinter dem Buchstaben F an die Normbezeichnung bei Nichteisenmetall-Knetlegierungen angefügt.)

Einen Überblick über die bei verschiedenen Legierungstypen erreichbaren Zugfestigkeitswerte gibt die Übersicht 5.43., Seite 144.

Die Auswahl der einzelnen Legierungen richtet sich neben den geforderten Festig-

Aushärtbare Typen	Nicht aushärtbare Typen
Knetlegierungen	
Al-Cu-Mg	Al-Mg
Al-Mg-Si	Al-Mg-Mn
Al-Zn-Mg ³	Al-Mn
Al-Cu-Ni	
Gußlegierungen	
Al-Si-Mg	Al-Si
Al-Si-Cu-Ni ¹	Al-Mg ²
	Al-Si-Cu ²

¹ Kolbenlegierungen

² Auch schwach aushärtbare Legierungen möglich

³ Nach dem Schweißen selbstaushärtende Legierungen

Übersicht 5.42.: Aushärtbare und nicht aushärtbare Aluminiumlegierungen (Auswahl)

keitseigenschaften und evtl. der elektrischen Leitfähigkeit nach der Korrosionsbeständigkeit. Dabei verhalten sich Legierungen, die elektrochemisch wesentlich edlere Elemente als Aluminium enthalten (z. B. Cu, Ni, Pb, vgl. Übersicht 5.25.), ungünstiger; das gilt in erhöhtem Maße bei Seewassereinwirkung. Besonders häufig werden folgende Knetlegierungen verwendet:

Al-Mg mit bis 5 % Mg bei Seewasserangriff,

Al-Si für hochfeste elektrische Leiter,

Al-Cu-Mg für Flugzeugteile.

Unter den Gußlegierungen sind besonders verbreitet

Al-Si für Gußstücke aller Art,

Al-Si-Cu-Ni für Kolben in Motoren aller Art.

Die Warmzugfestigkeitswerte verschiedener Aluminiumlegierungen zeigt Bild 5.41.

5.1.3.2. Kupfer und Kupferlegierungen

Kupfer. Mengenmäßig steht das Kupfer unter den unlegiert verwendeten Metallen an erster Stelle. Es erreicht im weichgeglühten Zustand eine Zugfestigkeit von $\sigma_z \geq 200 \text{ MPa}$ bei einer Bruchdehnung von $\delta \geq 40 \%$ und im hartgezogenen Zustand $\sigma_z \geq 440 \text{ MPa}$ und $\delta \geq 2\%$. Be-

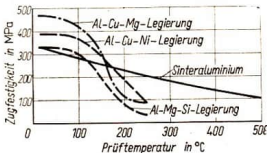
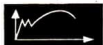


Bild 5.41. Warmzugfestigkeit verschiedener Aluminiumwerkstoffe [6]



Knetlegierungen		Gußlegierungen	
Legierungstyp	gewährleistete Zugfestigkeit in MPa höchstens	Legierungstyp	gewährleistete Zugfestigkeit in MPa höchstens
Al-Cu-Mg	430	Al-Si-Mg	240
Al-Mg-Si	310	Al-Si-Cu-Ni	330
Al-Zn-Mg ¹	570	Al-Si	180
Al-Cu-Ni	340	Al-Mg	245
Al-Mg	330	Al-Si-Cu	190
Al-Mn	150		
Al-Mg-Mn	255		

¹ + Cu, wegen hoher Korrosionsempfindlichkeit wenig verwendet. Ohne Cu ≤ 440 MPa und weniger korrosionsempfindlich

Übersicht 5.43.: Zugfestigkeit bei verschiedenen Aluminiumlegierungen

kannt sind seine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit und seine gute Korrosionsbeständigkeit.

Die Eigenschaften des Kupfers sind stark von seiner Reinheit abhängig. Bereits relativ kleine Sauerstoffgehalte wirken verspröndend und rufen außerdem die sogenannte Wasserstoffkrankheit des Kupfers hervor. Sie kommt beim Erwärmen in wasserstoffhaltiger Atmosphäre (z. B. Leuchtgas) dadurch zustande, daß Wasserstoff in das Kupfer eindringt und dort mit dem Sauerstoff zu H_2O reagiert. Der Wasserdampf sprengt das Kupfer dann auf. Abhilfe ist nur durch Verwendung von sauerstofffreien Kupfersorten zu schaffen, wenn nicht in wasserstofffreier Atmosphäre gegläht werden kann. Kupferarten mit hohen Fremddanteilen werden für Feuerbuchsen von Lokomotiven und ähnliche Zwecke verwendet. Die elektrische Leitfähigkeit wächst mit der Reinheit des Kupfers; für elektrotechnische Zwecke werden deswegen besonders reine Kupfersorten verwendet.

Kupferlegierungen. Einen Überblick über die gebräuchlichsten Kupferlegierungen mit ihren traditionellen Namen und Anhaltswerten über die erreichbaren Zugfestigkeitswerte gibt die Übersicht 5.44., Seite 145. Die Standards für Kupferlegierungen verwenden diese traditionellen Namen nicht mehr, sondern benutzen wie bei den Al-Legierungen Abkürzungen für die chemische Zusammensetzung, vergleiche Seite 40.

Von den Kupferlegierungen wird das Messing am häufigsten verwendet. Die mechanischen Eigenschaften dieser Kupfer-Zink-

Legierungen lassen sich aus Bild 5.46. ableiten.

Aus Bild 5.45. ergibt sich die bevorzugte Anwendung des Messings mit etwa 63% Cu für Federn und ähnliche kaltverformte Teile, da hier neben hoher Festigkeit eine große plastische Verformbarkeit existiert. Messing mit etwa 58% Cu werden wegen ihrer Sprödigkeit vorteilhaft für Automatenbearbeitung eingesetzt; hierfür werden mitunter noch kleine Bleianteile (1% bis 3%) zugesetzt. Wie aus Bild 5.46. weiter hervorgeht, hat α -Messing (kubisch flächenzentriertes Gitter) eine wesentlich höhere Verformbarkeit bei Raumtemperatur als β -Messing.

Dagegen bleibt die Warmverformbarkeit des α -Messings hinter der des β -Messings merklich zurück. Daher werden Legierungen mit etwa 60% Cu und 40% Zn bevorzugt für warmgepreßte Teile verwendet.

Gefürchtet ist die Spannungskorrosionsempfindlichkeit der gewöhnlichen Messinge (vgl. Abschnitt 5.1.1.6.) bei Vorliegen von Zugbeanspruchungen beim Einwirken von Ammoniak. Allgemein ist die Korrosionsbeständigkeit der Messinge gegenüber atmosphärischem Angriff gut, sie wird aber von der der Sondermessinge wesentlich übertroffen. Auch ist die Festigkeit der Sondermessinge bedeutend größer (Übersicht 5.44.). **Zinnbronzen** (oder echte Bronzen) werden vorwiegend vergossen. Gewalzt werden sie häufig für Schrauben und Federn verwendet, gegossen für Glocken und hochbelastete Verschleißteile (Lager).



Traditionelle Bezeichnung	Zusammensetzung	Gewährleistete Zugfestigkeit in MPa höchstens
Knetlegierungen		
Messing	≥ 56 % Cu, ≤ 44 % Zn	490
Tombak ¹	≥ 70 % Cu, 8 % bis 30 % Zn	420
Sondermessing	≥ 56 % Cu, ≤ 43 % Zn, ferner Al, Si, Mn, Fe, Sn	690
Neusilber	≥ 45 % Cu, ≤ 26 % Ni, ≤ 44 % Zn	690
Zinnbronze	≥ 91 % Cu, ≤ 9 % Sn	710
Aluminiumbronze	≥ 91 % Cu, ≤ 9 % Al	550
Gußlegierungen		
Gußmessing	≥ 58 % Cu, ≤ 42 % Zn	245
Guß-Sondermessing	≥ 57 % Cu, ≤ 35 % Zn, ferner Al, Si, Mn, Fe, Sn	590
Guß-Zinnbronze	≥ 80 % Cu, ≤ 20 % Sn	270
Guß-Aluminiumbronze	≈ 91 % Cu, ≈ 9 % Al	340
Guß-Bleibronze ²	≈ 75 % Cu, ≈ 25 % Pb	50
Mehrstoffbronzen	Cu + Ni, Al, Fe, Pb in verschiedener Zusammensetzung	
Rotguß	≥ 85 % Cu, ≤ 11 % Sn, ≤ 7 % Zn, ≤ 4 % Pb	260
Guß-Siliziumbronze	≥ 80 % Cu, 2 bis 4 % Si, 4 bis 16 % Zn	290

Übersicht 5.44.: Gebräuchliche Kupferlegierungstypen

¹ Messing mit erhöhtem Kupfergehalt
² Gleitlagermetall

Neusilber wird in der Feingerätetechnik, für Bestecke (Alpaka) und dergleichen verwendet. Eine bekannte Zn-freie Legierung ist das Konstantan mit 44 % Ni, das einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand

und einen sehr niedrigen Temperaturbeiwert des Widerstandes besitzt und deshalb als Werkstoff für elektrische Widerstände verwendet wird.

Aluminiumbronzen zeichnen sich durch be-

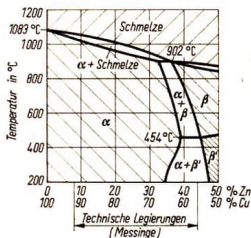


Bild 5.45. Ausschnitt aus dem Zustandsschaubild Kupfer-Zink

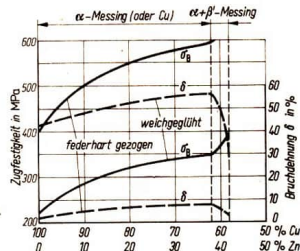


Bild 5.46. Zugfestigkeit und Härte der Kupfer-Zink-Legierungen (vgl. [14])



sondere Warmfestigkeit und Oxydationsbeständigkeit aus, während *Bleibronzen* hauptsächlich gegossen als Lagermetall verwendet werden. *Mehrstoffbronzen* werden in ähnlichen Verwendungsgebieten eingesetzt. Sie werden aber für die speziellen Zwecke in der Zusammensetzung eingerichtet. *Rotguß* ist für weniger beanspruchte Teile vorgesehen und ersetzt einen Teil des teuren Zinns durch Zink. Siliziumbronzen dienen als Austauschwerkstoff für Zinnbronzen und Rotguß.

5.2. Nichtmetallische Werkstoffe

5.2.1. Plaste und Elaste

5.2.1.1. Allgemeines

Plaste sind organische, makromolekulare Verbindungen, die ganz oder teilweise synthetisch hergestellt werden. Für die Einteilung der Plaste und Elaste gibt es noch kein allgemein-befriedigendes System. Man unterscheidet nach ihrem chemischen Aufbau C-Plaste, CO-Plaste, Si-Plaste und Si-Elaste. Nach ihrem Verhalten unter dem Einfluß von Wärme unterteilt man in die beiden Hauptgruppen Thermoplaste und Duroplaste. Schließlich lassen sich die Plaste einordnen nach dem Herstellungsverfahren. Übersicht 5.47. a und b zeigen die Einteilung der Plaste nach der Herkunft und nach dem Verhalten bei Erwärmung.

5.2.1.2. Gemeinsame Eigenschaften

Die Plaste haben folgende gemeinsame Eigenschaften:

geringe Dichte ($0,9 \text{ kgdm}^{-3}$ bis $2,2 \text{ kgdm}^{-3}$); leichte Formgebung bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen durch Ur- oder Umformen und daher niedrige Verarbeitungskosten; Variation der Eigenschaften durch Weichmacher, Füllstoffe, Stabilisatoren, Gleitmittel und Pigmente; leicht färbbar, sehr schlechte Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme (Isolatoren); niedriger Elastizitätsmodul und meist niedrige

Festigkeitswerte; niedriger Gebrauchstemperaturbereich (vgl. Bild 5.48., Übersicht 5.57.). Bei statisch belasteten Konstruktionen muß bereits bei Raumtemperatur die Dauerstandfestigkeit (Abschnitt 5.3.2.1.) berücksichtigt werden. Als organische Stoffe sind Plaste nicht unbrennbar, es gibt aber ausgesprochen schwer entflammare (z. B. PVC-hart) oder durch Beimengungen schwer entflammare Plaste. Über Plastbestimmung durch Dichtemessung und Brandprobe siehe Abschnitt 5.3.5.3. und Übersicht 5.66.

5.2.1.3. Verwendung

Von den Plasten werden, um aus der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten nur einige herauszugreifen, verwendet:

- Vulkanfaser für Elektromaschinenteile, Koffer, Bremsbeläge
- Zelluloid (Zellulosenitrat) für Brillen, Schmuck
- Füllstofffreie Phenolharze für Beschläge, Gebrauchsartikel
- Phenolharzpreßmassen je nach Füllstoff (Gesteinsmehl, Holzmehl, Papierfasern, Baumwollgewebeschnitzel) für Massenteile, wie Schalter, Lager, Karosserieteile
- Schichtpreßstoffe (Hartgewebe, Hartpapier) für Zahnräder, Lager, Keilriemenscheiben, Leiterplatten
- Aminoplastpreßmassen für Geschirr, Elektrogeräte
- Ungesättigte Polyesterharze ohne Verstärkung als Gießharze für Formteile, mit Glasfasern verstärkt als Lamine für Fahrzeugbau und Bootsbau
- Polyvinylchlorid (PVC)-hart für Rohre, Platten, Folien
- Polyvinylchlorid-weich für Verpackungsmittel
- Polyäthylene (PE) als Isolierstoff, vor allem in der HF-Technik, für Verpackungsmittel, Rohre

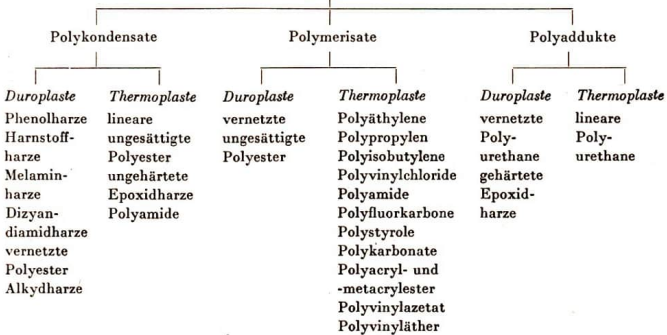
Abgewandelte Naturstoffe

Abgewandelte Naturstoffe	
Duroplaste	Thermoplaste
Kunstthorn	Zellulosenitrat
Vulkanfaser	Zelluloseazetat
	Zellulose-triazetat
	Zelluloseazetobutytrat

Übersicht 5.47. a: Einteilung der Plaste, Naturstoffe



Synthetische Werkstoffe



Übersicht 5.47. b: Einteilung der Plaste, synthetische Werkstoffe

- Polystyrol für Isolierstoffe vor allem in der HF-Technik. Spritzgußteile für Gebrauchsgegenstände aller Art, als Schaumstoff für Wärmeisolierungen und Verpackungen
- Polymethylacrylat (Piacryl) für optische Zwecke, Fahrzeugbau, Dentalmassen
- Polyamide für Zahnräder, Dichtungen, Lager, Kunstfasern (Dederon, Nylon)

- Lineare Polyurethane als Isoliermaterial
- Epoxidharze als Gießharze für Formteile, Modelle, Klebharze

Die Plaste werden vielfach mit Handelsnamen, z. B. Decelith für PVC, bezeichnet. Näheres siehe z. B. bei [13].

5.2.1.4. Eigenschaften wichtiger Massenplaste

Hinsichtlich der erzeugten Mengen stehen die Thermoplaste Polyvinylchlorid (und zwar PVC-hart), Polyäthylen (Hochdruck- und Niederdruck-Polyäthylen), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) an erster Stelle. Übersicht 5.51. gibt einige der wichtigsten Eigenschaften dieser Werkstoffe wieder. Werte für den Elastizitätsmodul sind in der Übersicht 5.57. (Abschnitt 5.3.2.1.) angegeben, wobei auch hier wie bei Zugfestigkeit und Streckgrenze nach Übersicht 5.51. auf die großen Differenzen zwischen Kurz- und Langzeitversuchen zu verweisen ist. Bild 5.49. enthält neben Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur für PVC-hart und Hochdruck-Polyäthylen noch Dauerstand-

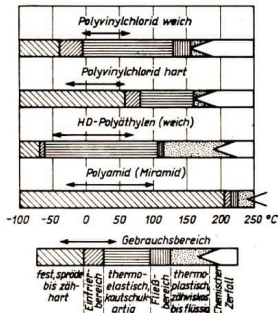


Bild 5.48. Eigenschaften einiger Thermoplaste in Abhängigkeit von der Temperatur [2]



festigkeitsangaben für PVC-hart. Diesen Kurven kann das Temperaturverhalten von PVC-hart und Polyäthylen-weich entnommen werden.

Polyäthylen wird mit niedriger Dichte (etwa 0,92) in einem Hochdruckverfahren erzeugt. Es ist weicher als das im Niederdruckverfahren hergestellte Polyäthylen, das bevorzugt mit einer Dichte von 0,95 verwendet wird.

Bei Polyäthylenen kann eine Ribbildung infolge Spannungen durch gleichzeitigen Angriff von Waschmittellösungen ähnlich der Erscheinungsform der Spannungsrißkorrosion bei Metallen verursacht oder beschleunigt werden.

Für die Verwendung von Thermoplasten als Rohrwerkstoff wurden Spannung-Zeit-Kurven ermittelt, wie sie für PVC-hart in Bild 5.50. und für Hochdruck-Polyäthylen in Bild 5.52 wiedergegeben sind.

Hinsichtlich ihres Brandverhaltens sind Polystyrol sowie Polyäthylene und Polypropylen als gut brennbar zu bezeichnen, dasselbe gilt auch oft für weichgemachtes PVC (PVC-weich, vgl. Übersicht 5.66., Seite 162). Beim Verbrennen von PVC können durch freierwerdende HCl schwere Korrosionsschäden an Maschinen und sonstigen Teilen entstehen. Polystyrol und PVC-hart sowie PVC-weich lassen sich gut kleben und schweißen; bei den Polyäthylenen und Polypropylenen ist nur Schweißen möglich.

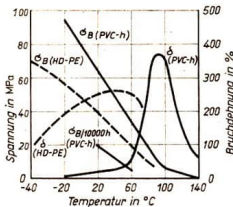


Bild 5.49. Zugfestigkeit, Dauerstandfestigkeit $\sigma_B/10000h$ und Bruchdehnung von PVC-hart sowie Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Hochdruck-Polyäthylen mit einer Dichte von 0,918 in Abhängigkeit von der Temperatur [15]

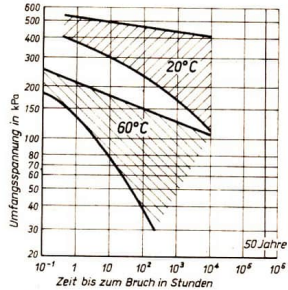


Bild 5.50. Streubereich der Bruchzeiten für Rohre aus PVC-hart nach A. J. Wildschut (vgl. [14])

5.2.1.5. Silikone

Silikonwerkstoffe sind Polykondensate in Form von polymeren Siliziumverbindungen. Sie nehmen eine Zwischenstellung ein zwischen den anorganischen, glasähnlichen Stoffen und den organischen Kohlenstoffverbindungen. Der Ausgangsstoff ist Quarzsand. Hergestellt werden Silikon-Öle, -Fette, -Gummi, -Harze, -Lacke.

Eigenschaften: hohe Wärmebeständigkeit (250 °C); hohe chemische Beständigkeit; gutes dielektrisches Verhalten; wasserabstoßende Wirkung; Elastizität bleibt zwischen -60 °C und +180 °C erhalten; Öle behalten zwischen -70 °C und +300 °C ihren flüssigen Zustand.

Verwendung: Öle als Schmiermittel bei sehr hohen und niedrigen Temperaturen; Trafo- und Schalteröle; Druckflüssigkeiten für hydraulische Anlagen; Überzüge; hochbeanspruchte Dichtungen; hitzebeständige Isolierungen; glasähnliche, hitzebeständige, wasserabstoßende Fasern und Gespinste.

5.2.1.6. Gummi

Der synthetische Gummi (Buna) ist ein Polymerisationsprodukt. Die wichtigsten Buna-sorten sind: Buna S5, Buna S3, Buna SS, Perbunan, Perbunan extra.



Eigenschaften	HD-PE (weich)	ND-PE (hart)	PP	PS	PVC-hart
σ_s in MPa	8 bis 20 ¹	20 bis 34	30 bis 40	44	50 bis 60
σ_z in MPa	10 bis 20	20 bis 34	30 bis 40	44	50 bis 60
Dehnung bei σ_s in %	> 1	10 bis 20	5 bis 15	1,5	1 bis 3
δ in %	150 bis 650	100 bis 800	5 bis 1 000	1,5	1 bis 3
Erweichungspunkt ² in °C	80 bis 115	125 bis 130	145 bis 155	90	90
Sprödigkeitstemperatur in °C	—60 bis <—75	—60 bis <—75	—10 bis +20	80	75
Dichte in kg dm ⁻³	0,916 bis 0,935	0,940 bis 0,965	0,905 bis 0,910	1,05	1,38
Resistenz ³ gegen					
Säuren	r	r	r	r	r
Alkalien	r	r	r	r	r
Alipatische Lösungsmittel	br	br	br	r	r
Aromatische und chlorierte Lösungsmittel	nr	nr	nr	nr	nr
Ketone	br	br	br	nr	nr

¹ Keine scharfe Streckgrenze

² Bestimmt mit der Vicatnadel als die Temperatur, bei der eine Stahlnadel von 1 mm³ Querschnitt und 49,03 N Belastung bei stetiger Erwärmung 1 mm tief eingedrungen ist

³ r = resistent br = begrenzt resistent
nr = nicht resistent

Übersicht 5.51.: Eigenschaften der in Großproduktion hergestellten Thermoplaste nach A. J. Windschut vgl. [14]

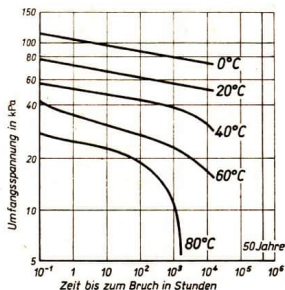


Bild 5.52. Spannung-Zeit-Kurven für Rohre aus Hochdruck-Polyäthylen (Dichte 0,918) nach A. J. Windschut (vgl. [14])

Die Gummiarten haben hohe Elastizität und können je nach Sorte Zugfestigkeiten bis zu 30 MPa und Dehnungen bis 700 % ausgesetzt werden. Sie sind beständig gegen Wasser, schwache (bis 20%ige) Alkalilaugen, Salz- und Schwefelsäuren.

Perbunan ist relativ beständig gegen Benzin und Dieselöl und weist eine geringe Gasdurchlässigkeit auf.

Perbunan und Buna S sind abriebfest, hitze- und alterungsbeständiger als Naturgummi.

Die Gebrauchseigenschaften können ebenso wie bei allen Plasten weitgehend dem Verwendungszweck angepaßt werden.

Hauptanwendungsgebiete:

Bereifungen, Schläuche, Isolierungen, Dichtungen, Förderbänder, Riemen, Walzen, Massenbedarfsartikel.



5.2.2. Holz

Die Hölzer können eingeteilt werden

- nach der Herkunft,
z. B. Nadelholz – Laubholz;
- nach der Härte,
z. B. Weichholz – Hartholz;
- nach der Behandlung,
z. B. Naturholz – vergütetes Holz.

Eigenschaften: Holz läßt sich leicht bearbeiten; es besitzt geringe Wärmeleitfähigkeit. Die Neigung zur Wasseraufnahme ist groß. Die Feuchtigkeiten für frisch gefälltes Nadelholz liegen bei uns zwischen 40 % und 170 %, für Laubholz zwischen 35 % und 130 %.

Der Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst die Rohdichte des Holzes. Die Dichte für luftgetrocknete Hölzer ist aus Übersicht 5.54. zu entnehmen.

Der wechselnde Feuchtigkeitsgehalt bewirkt das Schwinden und Schwellen (d. h. eine Volumenänderung) des Holzes. Diese Erscheinung wird auch als „Arbeiten“ des Holzes bezeichnet. Auf Grund der Anisotropie des Holzes ist das Schwinden und Schwellen in den drei Hauptorientierungsrichtungen (Längsrichtung, Radialrichtung, Tangentialrichtung) unterschiedlich.

Um das frisch geschlagene Holz mit dem relativ hohen Feuchtigkeitsgehalt technisch nutzbar zu machen, wird es einer Vorbehandlung, dem *Trocknen*, unterzogen.

Durch Herabtrocknen nimmt die Festigkeit mit abnehmender Holzfeuchte zu (Bild 5.53.). Man unterscheidet zwischen natürlicher und künstlicher (technischer) Holz Trocknung.

Die mechanischen Eigenschaften sind auf Grund der Holzstruktur in starkem Maße von der Beanspruchungsrichtung (parallel oder senkrecht zur Faser) abhängig (Übersicht 5.54.).

Infolge unterschiedlicher Wachstumsbedingungen schwanken die Festigkeitseigenschaften sehr stark.

Zerstörende Einflüsse und Holzschutz: Die Holzschädlinge des Tierreiches (z. B. Rat-

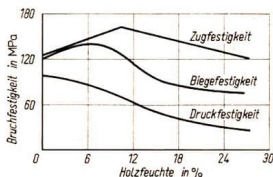


Bild 5.53. Abhängigkeit der Druck-, Zug- und Biegefestigkeit von der Holzfeuchte bei Buche (nach Kűch)

ten, Spechte, Termiten, Käfer) und die Holzschädlinge des Pflanzenreiches (z. B. Bakterien und Pilze) zerstören die Holzstruktur. Weiterhin ist Holz stark durch Feuer gefährdet. Einen gewissen Schutz bieten bereits verschiedene Oberflächenbehandlungen, Farbanstriche, Polituren und Beizen. Einen besseren Schutz gewährleisten Tauch- bzw. Tränkverfahren, die eine größere Tiefenwirkung haben [16].

Vergütetes Vollholz. Wir unterscheiden Preß-, Form-, Tränkvollholz.

Preßvollholz ist verdichtetes Vollholz. Die Verdichtung wird erreicht durch einen äußeren Druck bis zu 30 MPa bei Temperaturen bis 100 °C und einer Holzfeuchte von 8 % bis 15 %. Die Festigkeiten nehmen zu (s. ausführlich [16]).

Formvollholz (Biegeholz) ist gedämpftes und in Formen getrocknetes Holz (vgl. [16]).

Tränkholz erhält man durch Tränken des getrockneten Holzes mit verschiedenen Stoffen. Wird z. B. Holz mit niedrig schmelzenden Metallen getränkt, so entsteht das sogenannte *Metallholz* (guter Lagerwerkstoff). Durch Tränken mit Kunstharzen sinkt die Hygroskopizität und das Quellen; die Druckfestigkeit und Härte nehmen zu.

Lagenholz. Man unterscheidet unverdichtetes Lagenholz (Furniere, Sperrholz, Schichtholz) und verdichtetes Lagenholz (Preßlagenholz).

Furnierplatten bestehen mindestens aus drei Lagen, deren Faserrichtungen im Winkel von 90° zueinander stehen, um das *Arbeiten* des Holzes weitestgehend zu vermeiden.

Verbundplatten bestehen aus einer Mittellage und den beiderseitigen Außenlagen, die aus verschiedenen Werkstoffen bestehen und miteinander verbunden sind. Die Mittellage kann gebildet werden aus Vollholzstäben, Pappen, Schaumharz, Asbest, Kunstharzplatten, Faserplatten und ähnlichen Materialien. Hierzu gehören auch die *Tischlerplatten*.



Holzart	Lage zur Faser	Dichte ρ in kg dm ⁻³	Zugfestig- keit σ_Z in 10 ⁵ Pa	Druckfestigkeit σ_{dB} in 10 ⁵ Pa	Biegefestigkeit σ_B in 10 ⁵ Pa	Schubfestigkeit τ_B in 10 ⁵ Pa	
Eiche	senkrecht	0,4 – 0,7	– 0,95	5 – 9 – 18	4 – 5 – 6	7 – 9 – 10	0,5 – 1 – 1,5
	parallel			0,5	1		3
Esche	senkrecht	0,5 – 0,7	– 0,9	3 – 10 – 22	3 – 5 – 6	5 – 10 – 18	0,7
	parallel			0,7	1		
Hickory	senkrecht	0,7 – 0,8	– 1	15	5	11 – 12	1
	parallel			1	1		
Nußbaum (Walnuß)	senkrecht	0,6 – 0,7	– 0,75	10	4 – 6 – 7	8 – 12 – 14	–
	parallel			0,4	1		
Ulme (Rüster)	senkrecht	0,5 – 0,7	– 0,85	6 – 8 – 21	3 – 4 – 6	5 – 7 – 16	0,7
	parallel			0,4	1		2,5
Rotbuche	senkrecht	0,5 – 0,7	– 0,9	6 – 14 – 18	4 – 5 – 8	6 – 11 – 18	0,5 – 1 – 2
	parallel			0,7	1		3,5
Weißbuche	senkrecht	0,5 – 0,8	– 0,85	5 – 11 – 20	4 – 7 – 8	5 – 11 – 14	1
	parallel			0,6	1		3
Kiefer	senkrecht	0,3 – 0,5	– 0,9	4 – 10 – 19	3 – 5 – 8	4 – 9 – 20	0,5 – 1 – 1,5
	parallel			0,3	1		2
Pechkiefer (Pitchpine)	senkrecht	0,5 – 0,7	– 0,9	10	3 – 5 – 8	9	1
	parallel			0,3	0,7		
Fichte	senkrecht	0,3 – 0,5	– 0,7	4 – 9 – 24	3 – 5 – 7	4 – 7 – 12	0,5 – 1
	parallel			0,3	0,5 – 1		2,5
Tanne	senkrecht	0,3 – 0,45	– 0,7	5 – 8 – 12	3 – 4 – 5	4 – 6 – 10	0,5
	parallel			0,2	0,4		2,5
Gabun, Okumé	senkrecht	0,2 – 0,3	– 0,5	2 – 3 – 4	1 – 1,5 – 2	2,5	

Übersicht 5.54.: Dichte und Festigkeitseigenschaften von luftgetrockneten Nutzhölzern (kleinster Wert, Mittelwert, größter Wert)

Auf Holzbasis beruhen weitere Werkstoffe, wie z. B. Holzspanstoffe, Holzfaserverwerkstoffe.

Holzschliff, Holzzellstoff werden durch besondere mechanische bzw. chemische Verfahren aus Holz gewonnen und stellen das Ausgangsmaterial für die Papier- und Papierherstellung dar (s. ausführlich [16], [17]).

5.2.3. Keramik

5.2.3.1. Allgemeines

Für die Herstellung keramischer Erzeugnisse werden hauptsächlich plastische Rohstoffe (Kaoline, Tone) und unplastische Rohstoffe (Quarz, Feldspat) verwendet.

Die wichtigsten Phasen der Herstellung sind:

1. Aufbereitung der Rohstoffe,

2. Formgebung,

3. Trocknung,

4. Brennen bzw. Sintern.

Wesentlich ist, daß der eigentliche keramische Werkstoff erst nach dem Sintern vorliegt. In den Herstellungsstufen 2 und 3 haben wir es mit einem Rohstoffgemenge zu tun.

Eigenschaften der keramischen Erzeugnisse: temperaturbeständig, jedoch nicht temperaturwechselbeständig; hart; chemisch beständig; gutes elektrisches Isoliervermögen, schlechte Wärmeleitfähigkeit.

Keramische Erzeugnisse können unterteilt werden in Grob- und Feinkeramik.

5.2.3.2. Grobkeramik

Erzeugnisse der Baukeramik: Dachziegel, Klinker, Verblendungen, Entwässerungsröhre, Schaumkeramik.

Feuerfeste Erzeugnisse: Schamottesteine,



Spezialsteine für die Metallurgie (Dolomitsteine, Magnesitsteine).

Eigenschaften und Verwendung der grobkeramischen Erzeugnisse siehe [17].

5.2.3.3. Feinkeramik

Die Feinkeramik umfaßt außer der Geschirrkernamik, Sanitärkeramik und Kunstkeramik auch die technische Keramik.

Die *technische Keramik* gewinnt gegenwärtig immer mehr an Bedeutung. Mit keramischen Erzeugnissen können große Mengen wertvoller Rohstoffe eingespart werden. Darüber hinaus eröffnen sich Möglichkeiten in der Produktion von Werkstoffen mit spezifischen Eigenschaften, die die moderne Technik fordert.

Feinkeramische Werkstoffe. Sie sind auch unter den Handelsnamen Hartporzellan, Steatit, Calit, Ardostan bekannt. Diese technischen Porzellane sind Sinterwerkstoffe.

Hartporzellan hat gute mechanische Eigenschaften; ist nicht porös; flüssigkeits- und gasdicht; widerstandsfähig gegen Abrieb; geruch- und geschmacklos; beständig gegen alle Säuren, außer Flußsäure; bis 30 °C beständig gegen Alkalien. Es ist empfindlich gegen scharfe Temperaturwechsel (Temperatursprünge über 50 K vermeiden). Für die Verwendung seien einige Aggregate und Bauteile genannt, die hauptsächlich in der chemischen Industrie, Lebensmittel-, Elektro- und Textilindustrie eingesetzt werden: Pumpen, Absperrorgane, Leitungen, Kolonnenteile zum Filtrieren, Standgefäße, Rührkessel, Isolatoren, Strangführer für Textil- und Chemiefasertechnik. *Steatit* hat einen hohen Isolationswiderstand und höhere Festigkeitswerte als Hartporzellan und weist geringe dielektrische Verluste auf. Es wird hauptsächlich für Zündkerzen verwendet.

Calit hat hohe Festigkeit und hohen Isolationswiderstand, weist sehr geringe dielektrische Verluste auf und ist wetterbeständig.

Es wird eingesetzt für Hochspannungsisolatoren, Durchführungen, Rundstäbe u. a. Auch mit aufgebrannten Metallbelägen kommt es zum Einsatz für Spulen, Kontaktleisten, Röhrenfassungen u. a.

Oxidkeramische Werkstoffe. *Schneidkeramik.* In der DDR wurden bisher drei grundverschiedene Keramiksorten entwickelt:

1. die reine Oxidkeramik (Al_2O_3),
2. die Mischkörper aus Oxidkeramik und Metalloxid (z. B. Fe, Ni, Cr, Mo), die sogenannten *Cermets*,
3. die Verbundwerkstoffe aus Oxidkeramik und Schwermetallkarbidsystemen (z. B. TiC , Mo_2C).

Die Härte ist gleich oder etwas höher als bei den härtesten und verschleißfesten Sinterhartmetallen und ist temperaturabhängig.

Die sehr geringe Kaltbiegefestigkeit (200 MPa bis 590 MPa) liegt weit unter der der Hartmetalle. Schneidkeramik hat eine sehr hohe Druckfestigkeit, ist aber sehr spröde und stoßempfindlich. Die Sprödigkeit kann durch geeignete Bindemittel und durch Zusatz von Metall- und Schwermetallkarbiden gemindert werden. Der Zusatz von Schwermetallkarbiden erhöht besonders die Biegefestigkeit. Der Wärmeausdehnungskoeffizient liegt um 40 % bis 100 % niedriger als bei Stahl. Die Wärmeleitfähigkeit ist sehr klein. Nachteilig ist die ungenügende Temperaturwechselbeständigkeit (bei reinen Oxidkeramiken geringer als bei den Verbundwerkstoffen). Schneidkeramiken sind die z. Z. verschleißfestesten Werkstoffe.

Verwendung finden die Schneidkeramiken als Schneidplatten für die verschiedensten zerspanenden Werkzeuge (hauptsächlich Drehmeißel und Fräser). Die Platten sind allseitig geschliffen und werden als Wendplatten eingesetzt (s. ausführlich [18]).

Als *Manifer* bezeichnet man weichmagnetische Sinterwerkstoffe (weichmagnetische Ferrite). Die Grundlage bilden nichtmetallische, ferromagnetische Ferrite, die aus Eisenoxid oder einem oder mehreren Oxiden zweiwertiger Metalle bestehen. Sie bil-



den miteinander Gemenge oder chemische Verbindungen. Hauptanwendungsgebiete in der Elektrotechnik: Spulenkern für Filter, Schwingungskreise, Übertrager, Kerne für Zeilentrafos, Antennenstäbe, Ringkerne für Speicherzwecke.

Maniperm sind hartmagnetische Sinterwerkstoffe (hartmagnetische Ferrite).

Grundlage bilden Eisenoxid und Bariumoxid. Vorteilhaft ist die geringe Dichte und große Härte. Spanend läßt es sich nur durch Schleifen bearbeiten. Es ist nicht beständig gegen verdünnte Schwefel- und konzentrierte Salzsäure. Hauptanwendungsgebiet: verschiedenartigste Magnete für die elektrotechnische Industrie, Haftmagnete für den Schulgebrauch.

Piezelektrische Werkstoffe. Piezolan ist ein in den *Keramischen Werken Hermsdorf* hergestellter oxydischer Sinterwerkstoff auf Bariumtitanatbasis.

Piezelektrische Werkstoffe werden für die Umwandlung elektrischer Schwingungen in mechanische Schwingungen (reziproker Piezoeffekt) und umgekehrt (direkter Piezoeffekt) verwendet.

Die Fakten und Zahlenangaben wurden teilweise aus Prospektmaterial des VEB Keramikwerke Hermsdorf entnommen.

5.3. Werkstoffprüfung

5.3.1. Allgemeines

Aufgaben der Werkstoffprüfung sind im wesentlichen die Güteüberwachung in den Betrieben, die Aufklärung von Beanstandungen und Schäden, die Erarbeitung von Unterlagen für die Steigerung der Qualität der Werkstoffe und die Unterstützung der Grundlagenforschung.

Infolge der Vielzahl an Werkstoffen und ihrer Aufgaben gibt es eine große Anzahl von Prüfverfahren, z. B. mechanische, zerstörungsfreie, metallographische, physikalische und chemische Prüfverfahren.

Bei dieser Systematik ist zu beachten, daß sich die einzelnen Verfahren verschieden einordnen lassen. Es können z. B. verschie-

dene physikalische oder chemische Prüfverfahren auch als zerstörungsfreie Verfahren angesehen werden.

Für die Prüfung der Plaste wurden zusätzlich vor allem thermische Verfahren entwickelt (z. B. Formbeständigkeit nach *Martens*) und die mechanischen Verfahren den besonderen Eigenschaften angepaßt. Bei der Prüfung keramischer Werkstoffe sind die standardisierten Prüfvorschriften zu beachten. Die am Prüfkörper ermittelten Werte sind Vergleichswerte und können nicht ohne weiteres auf andere Werkstücke übertragen werden.

5.3.2. Mechanische Prüfverfahren

5.3.2.1. Statische Festigkeitsprüfungen

Allgemeines. Statische Festigkeitsprüfungen werden mit ruhender Last oder mit allmählich stoßfrei zunehmenden Kräften durchgeführt.

Zugversuch. Der Zugversuch ist das wichtigste technische Prüfverfahren. Er wird so ausgeführt, daß mit sogenannten Einspannköpfen versehene Stabproben in einer Prüfmaschine langsam und stoßfrei bis zum Bruch belastet und dabei Spannung und Dehnung der Probe gemessen werden. Dabei ergeben geometrisch ähnliche Proben für Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Brucheinschnürung die gleichen Werte (*Kicksches Ähnlichkeitsgesetz*).

In Abschnitt 5.1.1.5. (Bild 5.21.) ist bereits über das Spannung-Dehnungs-Diagramm beim Zugversuch im Zusammenhang mit der elastischen und der plastischen Verformung berichtet worden. Das Spannung-Dehnungs-Diagramm tritt bei Metallen in zwei Hauptformen auf, und zwar einmal ohne ausgeprägte Streckgrenze (Bild 5.55.a) bei den meisten Nichteisenmetallen und zum anderen mit ausgeprägter Streckgrenze (Bild 5.55.b), vor allem bei Baustählen unterhalb von etwa 300°C. Bei Fehlen der ausgeprägten Streckgrenze wird die Dehngrenze (0,2-Grenze) ermittelt. Auch bei Plasten sind verschiedene Formen möglich (Bild 5.55.c). Hier gibt aber der Zerreißver-



such im Gegensatz zu Metallen nur Vergleichswerte, weil schon bei Raumtemperatur starkes Kriechen erfolgt (vgl. Abschnitt 5.2.1.3.).

Die im Zugversuch ermittelten Größen sind in der Übersicht 5.56. zusammengestellt und erklärt.

Während die Spannungs- und Dehnungswerte bei Metallen stark von der jeweiligen Legierung abhängig sind, trifft dies beim Elastizitätsmodul, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung im elastischen Bereich charakterisiert, nicht zu (Übersicht 5.57.). Wie aus Übersicht 5.57., Seite 155, hervorgeht, ist der E -Modul bei metallischen Werkstoffen wesentlich höher als bei Holz oder Plasten.

Mit steigender Temperatur sinken im allgemeinen Streckgrenze, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul, und es steigen Bruchdehnung und Brucheinschnürung. Bild 5.58. zeigt diese Verhältnisse schematisch für einen unlegierten und alterungsunempfindlichen Baustahl (bei alterungsempfindlichem Stahl liegen die Verhältnisse zwischen etwa 100 °C und 300 °C etwas anders). Auch bei Thermoplasten nimmt der Elastizitätsmodul mit der Temperatur ab, wie Bild 5.59. für Polyäthylene zeigt (vgl. Übersicht 5.51.

und 5.57.). In ähnlicher Weise wie bei Stahl sinkt die Zugfestigkeit und steigt die Dehnung (Bild 5.49.).

Bis zu etwa 300 °C kann man unlegierte Stähle nach der bei der vorgesehenen Betriebstemperatur gemessenen Warmstreckgrenze dimensionieren. Mit Annäherung an die Kristallerholungstemperatur (Bild 5.23.) ist dies nicht mehr möglich, und es kann trotz unter der Warmstreckgrenze liegender Beanspruchung im Laufe der Zeit ein Bruch eintreten. So hat z. B. nach TGL 7961 ein unlegierter Stahl mit 0,45 % C bei 400 °C. eine Warmstreckgrenze von mindestens 190 MPa, bricht aber nach 100000 Stunden Dauerbelastung schon bei etwa 140 MPa. Die Dehnung nimmt bei einer Belastung oberhalb der Dauerstandfestigkeit im Laufe der Zeit immer mehr zu, und es kommt zum Bruch. Unterhalb der Dauerstandfestigkeit kommt das „Kriechen“ des Stahls unter der Last zum Stillstand, ein Bruch erfolgt nicht. Praktisch benutzt man als Dauerstandfestigkeit bei Metallen die Spannungswerte, die nach bestimmter Belastungsdauer eine bleibende Dehnung von 0,2% oder auch 1% hervorrufen (Zeit-Dehn-Grenze). Die Zeit-Dehn-Grenzen nehmen mit steigender Belastungsdauer ab, wie

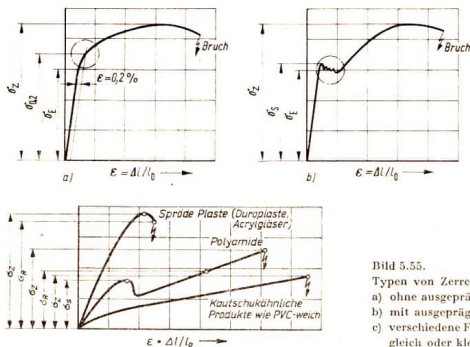


Bild 5.55.

Typen von Zerreißdiagrammen:

- a) ohne ausgeprägte Streckgrenze bei Metallen
- b) mit ausgeprägter Streckgrenze bei Metallen
- c) verschiedene Formen bei Plasten (σ_z kann größer, gleich oder kleiner als $\sigma_{z0.2}$ sein)



Formelzeichen	Benennung	Einheit	Bemerkung
σ	Spannung	MPa	Technische Spannung = Kraft/Ausgangsquerschnitt
σ_E	Elastizitätsgrenze	MPa	Unterhalb σ_E gilt $\sigma/\varepsilon = E$ (Hookesches Gesetz) ²
σ_S	Streckgrenze	MPa	
$\sigma_{0,2}$	Dehngrenze (0,2-Grenze)	MPa	Spannung, die eine bleibende Dehnung von 0,2% hervorruft
σ_R	Reißfestigkeit ¹	MPa	Spannung im Augenblick des Anreißen
σ_Z	Zugfestigkeit	MPa	
ε	Dehnung	dimensionslos, meist $\cdot 100$ und in % angegeben	Absolute Längenänderung/Ausgangslänge ($\Delta l/l_0$)
δ	Bruchdehnung	dimensionslos, meist $\cdot 100$ und in % angegeben	Wird nach Zusammenlegen der gebrochenen Stabhälften ermittelt
ψ	Bruch-einschnürung	dimensionslos, meist $\cdot 100$ und in % angegeben	Querschnittsreduzierung an der Bruchstelle/Ausgangsquerschnitt
E	Elastizitätsmodul	GPa	siehe σ_E (oben)

Übersicht 5.56.: Im Zugversuch ermittelte Kenngrößen

¹ Nur bei Plasten und Elasten

² Bei Stahl und vielen NE-Metallen hinreichend genau, bei Grauguß und vor allem bei Plasten nur angenähert

Werkstoff	E-Modul in GPa	Werkstoff	E-Modul in GPa
Stähle gewalzt und gegossen (Stahlguß)	≈ 210	Polyamide	bis 2,9
Grauguß		Polyäthylene	bis 1,4
mit $\sigma_Z \approx 250$ MPa	$\approx 120^1$	Polypropylene	bis 1,6
mit $\sigma_Z \approx 150$ MPa	$\approx 80^1$	Polystyrole	bis 3,4
Cu und Cu-Legierungen	100 bis 120	Polyvinylchloride	bis 2,9
Al und Al-Legierungen	≈ 70	Tanne, Fichte,	
Phenolharz-Preßmassen	bis 15	Kiefer	10,8 bis 11,8
Polyester- und Epoxid-Gießharze	bis 4	Pappel, Linde,	
Verstärkte Polyester- und Epoxidharze	bis 50	Weide	7,3 bis 8,6
		Ulme (Rüster),	
		Esche	10,8 bis 11,8
		Nußbaum, Eiche	12,3 bis 12,7
		Rotbuche, Birke	15,7 bis 16,2

¹ Mit zunehmender Belastung abfallend

Übersicht 5.57.: Elastizitätsmodul wichtiger metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe



aus Bild 5.60. hervorgeht. Man ist deshalb auf sehr teure und langwierige Versuche (Belastungsdauer bis zu 100000 Stunden entsprechend $11\frac{1}{2}$ Jahren) angewiesen, zumal Extrapolation von kleineren Belastungsdauern auf größere unsicher ist. Über die entsprechenden Verhältnisse bei Platten siehe Abschnitt 5.2.1.4.

Die bei höheren Temperaturen stark verminderte Streckgrenze der unlegierten Stähle (Bild 5.58.) ergibt die Möglichkeit des Ausgleichens von inneren Spannungen in Werkstücken, die durch die Fertigung (z. B. durch Schweißen) in ihnen erzeugt wurden. Dieses sogenannte *Spannungsfreigählen* wird bei Temperaturen zwischen 450 °C und 650 °C durchgeführt; anschließend wird langsam (im Ofen) abgekühlt.

Biegeversuch. Der Biegeversuch wird gern zur Bestimmung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls spröder Werkstoffe wie Grauguß verwendet und normalerweise durch mittige Belastung der Probe bei Lagerung auf zwei Stützen (Bild 3.68.d, Seite 97) ausgeführt. Im Schulversuch läßt sich der Elastizitätsmodul relativ einfach bestimmen, wenn man stattdessen die (nicht standardisierte) Form der Belastung eines einseitig eingespannten Probestabes (Bild 3.68.c) wählt.

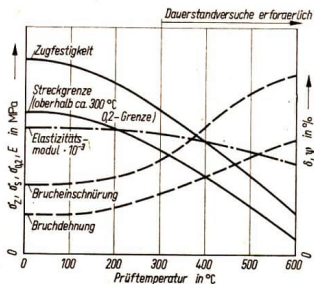


Bild 5.58. Änderung mechanischer Eigenschaften eines unlegierten, alterungsbeständigen Baustahls (schematisch)

Für einen Probeträger mit rechteckigem Querschnitt (empfohlen wird 20 mm Breite \times 2 mm Dicke \times 150 mm freie Länge, d. h., daß die Probe, um eingespannt werden zu können, etwa 200 mm lang sein muß) ist

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{20 \text{ mm} \cdot 2^3 \text{ mm}^3}{12} = 13,3 \text{ mm}^4$$

und für den einseitig eingespannten Träger ist die Auslenkung am freien Ende

$$f = \frac{F \cdot l^3}{12 \cdot E \cdot I_x} \quad \text{und damit} \quad E = \frac{l^3}{12 \cdot I_x} \cdot \frac{F}{f}$$

und für die Probe

$$E = \frac{150^3 \text{ mm}^3}{20 \text{ mm} \cdot 2^3 \text{ mm}^3} \cdot \frac{F}{f} = 2,11 \cdot 10^4 \text{ mm}^{-2} \cdot F \cdot N$$

Die bei einer bestimmten Kraft an der Staboberfläche wirkende Biegespannung ist (vgl. S. 99)

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

und für die Probe

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot 150 \text{ mm}}{2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 2^2 \text{ mm}^2} \cdot F \cdot N = 2,81 \text{ mm}^{-2} \cdot F \cdot N$$

Die Formeln gelten nur im elastischen Bereich, d. h., der mit unterschiedlichen Belastungen ermittelte E -Modul muß annähernd gleich sein. Bei Stahl wird dies bei Spannungen bis etwa 200 MPa und bei Aluminium bis etwa 20 MPa unabhängig von der Legierung immer erfüllt sein. Notfalls läßt man die Ergebnisse mit zu großer Belastung (zu niedrige Werte) weg. Die Auslenkung sollte mit einer Feinmeßschraube gemessen werden. Der Bau einer speziellen Vorrichtung für den Versuch ist zweckmäßig.

Druckversuch. Dem Druckversuch werden vor allem relativ spröde (wenig verformbare) Werkstoffe unterworfen (Lagermetalle, Beton, Ziegel u. a.).

Der Versuch wird auf speziellen hydraulischen Pressen oder in Universalprüfmaschinen durchgeführt. Um Knickbeanspruchungen zu vermeiden, verwendet man gedrungene Proben. Form und Abmessungen der Druckproben sind standardisiert. Bei Belastung bilden sich Rutschkegel aus, die den Werkstoff zu zersprengen versuchen (Bild 5.61.). Sie entstehen durch Reibung der Stirnflächen an den Druckplatten. Ein Bruch entlang der Rutschkegelflächen ist charakteristisch für relativ spröde Werkstoffe. Bei zähen, plastischen Werkstoffen bilden sich tonnenförmige Ausbauchungen, bei weiterer Belastung Radialrisse.

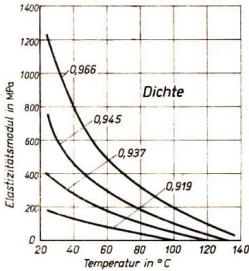


Bild 5.59. Einfluß der Temperatur auf den Elastizitätsmodul der verschiedenen Polyäthylene nach van Raamsdonk (vgl. [14])

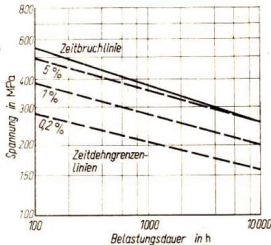


Bild 5.60. Abnahme der Warmfestigkeit (Zeit-Standfestigkeit) von Stahl bei Temperaturen oberhalb 300 °C mit steigender Belastungsdauer (schematisch) [9]

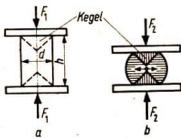


Bild 5.61. Verformung bei zylindrischen Druckproben (schematisch)

Statische Härteprüfverfahren. Brinellhärteprüfung. Eine gehärtete Stahlkugel vom Durchmesser d wird unter der Belastung F in das Prüfstück eingedrückt. Das Verhältnis von Belastung F und Oberfläche des er-

zeugten Eindrucks (Kugelalotte) A_k gibt die Brinellhärte an¹

$$HB = \frac{F}{A_k} \text{ bzw.}$$

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot d (d - \sqrt{d^2 - d_k^2})}$$

Für die Berechnung und Auswertung wird der Kalottendurchmesser d_k verwendet, weil er sich besser messen läßt als die Eindringtiefe h . Bei unterschiedlichen Belastungen und Kugeldurchmessern erhält man für $F/d^2 = \text{konst.}$ ähnliche Eindrücke. Diese Konstante wird als Belastungsfaktor bezeichnet und ist für die einzelnen Werkstoffgruppen festgelegt, sie beträgt z. B. für Stahl 30. Weitere Zahlenwerte siehe [19]. Für Stahl wird der Normalversuch mit $F = 3000 \text{ kp}$, $d = 10 \text{ mm}$; $t = 10 \text{ s}$ durchgeführt.²

Es bestehen annähernde Beziehungen zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit bei nicht austenitischen ungehärteten Stählen (nicht hochlegierte Stähle).

$$\sigma_z \approx 0,35 \cdot HB$$

Härtewerte über etwa 450 Brinelleinheiten können mit den in der Praxis gebräuchlichen gehärteten Stahlkugeln als Prüfkörper nicht mehr ermittelt werden.

Vickershärteprüfung. Eine Diamantpyramide, Spitzenwinkel 136° , wird in das Prüfstück eingedrückt.

Berechnung (vgl. Brinell) ergibt^{1,2}

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1,854 F}{d^2}$$

F = Meßkraft (in kp)

A = Oberfläche der eingedrückten Pyramide (in mm^2)

d = Länge der Diagonale der eingedrückten Pyramide (in mm)

¹ Die Härte wurde bisher — unabhängig vom statischen Härteprüfverfahren — in der SI-fremden Einheit kp mm^{-2} angegeben ($1 \text{ kp mm}^{-2} = 9,80665 \text{ MPa}$). Mit der weiteren schrittweisen Einführung des SI-Systems (vgl. Abschnitt 1.1.) sind diese Härteangaben nicht in die SI-Einheit Pa umzurechnen. Die Härte wird jedoch nur noch mit dem entsprechenden Zahlenwert angegeben; die Einheit ist nicht mehr zu nennen (z. B. $HV = 315$ für $HV = 315 \text{ kp mm}^{-2}$).

² $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$



Die Belastungen sind sehr viel kleiner als bei der *Brinell*-prüfung und liegen zwischen 1 kp und 120 kp¹. Die *Vickers*-prüfung hat als einziges Härteprüfverfahren eine durchlaufende Skale für weiche und harte Stoffe. Wegen der geringen Belastung ist die Prüfung sehr dünner Schichten möglich. Bis zu etwa 350 *Vickers*einheiten stimmen *Vickers*- und *Brinell*härte überein.

Rockwellhärteprüfung. Die *Rockwell*härteprüfung verwendet für weniger harte Werkstoffe eine Stahlkugel mit 0,16 mm (1/16") Durchmesser und für harte einen Diamantkegel mit 120° Spitzenwinkel. Gemessen und ausgewertet wird die Eindringtiefe. Um eine genauere Eindringtiefmessung vornehmen zu können, wird das Werkstück mit einer Vorlast (10 kp)¹ belastet. Folgende Arbeitsgänge werden bei der Prüfung ausgeführt:¹

1. Werkstück mit Vorlast (10 kp) belasten,
2. Werkstück mit Hauptlast (90 kp für die Stahlkugel und 140 kp für den Diamantkegel) belasten,
3. Werkstück auf Vorlast entlasten.

Die Differenz zwischen 3. und 1. ist das Maß für die Härte. Eine *Rockwelleinheit* entspricht 0,002 mm Tiefenunterschied. Damit eine größere Härte auch durch eine größere Zahl ausgedrückt wird, zieht man die Eindringtiefe e von einer willkürlich festgelegten Zahl ab. Bei der Kugelpprüfung ist $HR\ b = 130 - e$ in 0,002 mm (ball = Kugel). Bei der Prüfung mit dem Diamantkegel ist $HRC = 100 - e$ in 0,002 mm (cone = Kegel). Das Verfahren ist weit verbreitet, weil der Härtewert schnell und einfach zu bestimmen ist (Betriebsmeßverfahren). *Brinell*- und *Vickers*prüfung erfordern mehr Zeit, sind aber genauer.

Außer den hier behandelten statischen Härteprüfverfahren wurden einige dynamische Härteprüfverfahren entwickelt. In der Praxis ist der von der Poldihütte in Kladno herausgebrachte Schlaghärteprüfer (sogenannter Poldihammer) oft anzutreffen (s. ausführlich [19], [20]).

¹ 1 kp = 9,80665 N

5.3.2.2. Dynamische Prüfverfahren

Dauerschwingversuch (Festigkeit bei wechselnder Beanspruchung). Schwingende Belastung führt zur Ermüdung des Werkstoffes und schließlich zum Bruch. Der Bruch kann schon bei wesentlich unterhalb der Zugfestigkeit liegender Spannung als Dauer- oder Ermüdungsbruch auftreten. Dauerbrüche stellen die Mehrzahl aller Schadensfälle an Maschinen. Die Dauerbruchfläche ist gekennzeichnet durch die auf Grund wechselnder Beanspruchung erzeugte feinkörnige Dauerbruchzone (Dauerbruchfläche mit Rastlinien) und durch die grobkörnige, zerklüftete Gewaltbruchzone (Restbruchfläche). Ausgangsstellen für Dauerbrüche sind meistens konstruktionsbedingte Kerben (Nuten, schroffe Querschnittsübergänge), Oberflächenriefen und raue Oberflächen. An diesen Stellen treten erhebliche Spannungsspitzen auf, die einen Dauerbruch auslösen. Die Kerbempfindlichkeit nimmt bei Stählen mit steigender Zugfestigkeit zu (Bild 5.62.). Die Dauerschwingfestigkeit wird für eine bestimmte Mittelspannung σ_m ermittelt. Je nach der Lage der Mittelspannung unterscheidet man verschiedene Bereiche der Dauerschwingbeanspruchung (Bild 5.63.). Die einzelnen Spannungen des Spannungs-Zeit-Verlaufes werden nach Bild 5.64. gekennzeichnet.

Dabei wird angegeben: $\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_a$ (in MPa) (σ_D = Dauerschwingfestigkeit).

Sonderfälle treten auf für $\sigma_m = 0$ ($\sigma_D = \pm \sigma_a = \sigma_w$ = Wechselfestigkeit, z. B. bei reiner Biegebeanspruchung) und $\sigma_m = \sigma_a$ ($\sigma_D = \sigma_a \pm \sigma_a = \sigma_{sch}$, Schwellfestigkeit, $\sigma_u = 0$ und $\sigma_o = 2\sigma_a$).

Die Dauerschwingfestigkeit wird für verschiedene Mittelspannungen durch einen sogenannten *Wöhler*versuch bestimmt. Soll das Werkstoffverhalten umfassender untersucht werden, so sind für ein und denselben Werkstoff mehrere *Wöhler*kurven mit verschiedener Mittelspannung aufzunehmen. Die Versuchsergebnisse werden dann in einem sogenannten Dauerschwingfestigkeits-Diagramm (verbreitet ist das

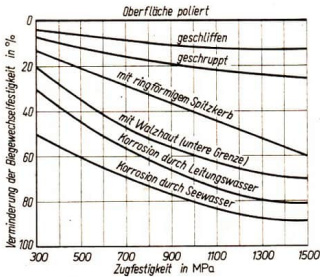


Bild 5.62. Verminderung der Biegezugfestigkeit von Stählen bei unterschiedlicher Zugfestigkeit durch Kerbwirkung nach Mailänder [9]

Schleifendiagramm nach Smith; vgl. [19]) vereinigt.

Bei kleinen Lastwechselzahlen kann der Werkstoff bis zur Schadenslinie im Wöhlerdiagramm überbelastet werden, ohne daß seine Dauerschwingfestigkeit beeinträchtigt wird.

Kerbschlagbiegeversuch. Der Zweck dieses Versuches ist es, die Zähigkeit des betrachteten Werkstoffes (hauptsächlich Stahl) bei schlagartiger Beanspruchung und unterschiedlichen Temperaturen zu ermitteln. Der Versuch wird auf Pendelschlagwerken durchgeführt. Man erhält nur Vergleichswerte und keine umrechenbaren Werte für weitere Festigkeitsberechnungen. In dabei verbrauchte Schlagarbeit wird gemessen und aus ihr die Kerbschlagzähigkeit a_k berechnet.

$$a_k = \frac{\text{verbrauchte Schlagarbeit}}{\text{gekerbter Querschnitt}} = \frac{W}{A} \text{ in Jmm}^{-2}.$$

Der Versuch wird häufig angewendet, weil ein Zusammenhang besteht zwischen der Kerbschlagzähigkeit und der Sprödbuchanfälligkeit (Abschnitt 5.1.2.5.). In vielen Ländern wird nur die verbrauchte Schlagarbeit ermittelt, da das Ähnlichkeitsgesetz

nicht gilt und daher die Bezugnahme auf den gekerbten Querschnitt unsinnig ist.

5.3.3. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

5.3.3.1. Allgemeines

Wie der Name besagt, soll durch zerstörungsfreie Prüfverfahren der Werkstoff ohne Schädigung untersucht werden, und zwar häufig erst am fertigen Teil. Dabei wird besonders eine Prüfung auf innere Fehler wie Risse, Lunker oder sonstige Fehlstellen durchgeführt.

5.3.3.2. Durchstrahlungsverfahren (Röntgen-grobstrukturuntersuchungen und Prüfung mit radioaktiven Isotopen)

Man benötigt zur Röntgen-grobstrukturuntersuchung eine Röntgenröhre und arbeitet hauptsächlich mit Filmaufnahmen. Im Werkstück vorliegende Fehlstellen wie Lunker und auch porige Stellen in Schweißnähten erscheinen dann durch größere Schwärzung auf dem Filmnegativ, weil hier

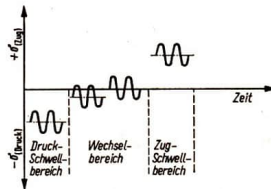


Bild 5.63. Belastungsbereiche beim Dauerschwingversuch

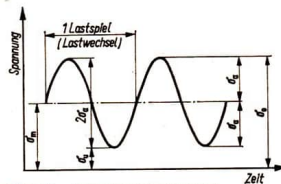


Bild 5.64. Spannung-Zeit-Schaubild



effektiv eine geringere Durchstrahlungsdicke vorliegt. Die mögliche Durchstrahlungsdicke hängt z. B. von der an die Röhre angelegten Hochspannung ab; die größten durchstrahlbaren Werkstoffdicken betragen für Kupfer etwa 75 mm, für Stahl etwa 120 mm und für Aluminium etwa 600 mm [21]. Gut erkennbar sind alle größeren Fehler im Werkstück, schlecht dagegen Risse, wenn sie nicht gerade in Durchstrahlungsrichtung liegen.

Statt der Röntgenröhre kann auch die natürliche durchdringende Strahlung radioaktiver Isotope (Gammastrahlung) verwendet werden. Vorteilhaft ist die Kleinheit des Strahlers, die auch die Prüfung komplizierter Teile ermöglicht, nachteilig der erhebliche Schutzaufwand.

5.3.3.3. Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung beruht auf der Erscheinung, daß die im Innern eines magnetisierten ferromagnetischen Körpers (z. B. Stahl) verlaufenden Feldlinien an oberflächennahen Fehlstellen zum Austreten an der Fehlstelle gezwungen werden. Durch Eisenpulver lassen sich diese Fehlstellen nachweisen. In der Praxis verwendet man in Petroleum oder Öl gemischte feinste Pulver (Fe_3O_4), die während der Magnetisierung über die blanke Oberfläche des Prüflings fließen, am Fehler erscheint dann eine Schwärzung der Oberfläche. Die Magnetisierung erfolgt auf elektrischem Wege.

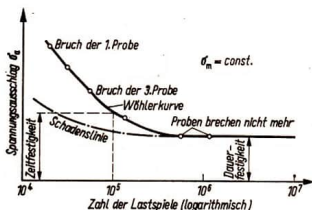


Bild 5.65. Wöhlerkurve und Schadenslinie

5.3.3.4. Ultraschallprüfung

In seiner gebräuchlichsten Art verwendet das Ultraschallverfahren als Impuls-Echo-Verfahren die Laufzeit von Ultraschallwellen im Material zur Fehlerortung. Dabei werden Ultraschallimpulse mit Frequenzen zwischen 0,25 MHz und 7 MHz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$) in das Prüfstück geschickt und die Laufzeit des Echos von der Prüflingsrückwand und von etwaigen davorliegenden Fehlern gemessen. Die Anzeige erfolgt auf einer Braunschen Röhre. Die Tiefenlage von Fehlern ist sehr genau bestimmbar, Schwierigkeiten bereitet die Ermittlung der Fehlergröße und das Finden von oberflächennahen Fehlern (Abstände näher als 5 mm zur Einschallfläche). Die maximalen Prüfdicken liegen bei etwa 10 m. Durch Messung der Ultraschallschwächung bei hohen Prüffrequenzen ($\leq 15 \text{ MHz}$) ist es auch möglich, Rückschlüsse auf die Korngröße und auf die Versprödungstemperatur unlegierter und niedriglegierter Stähle zu ziehen [22].

5.3.4. Technologische Prüfverfahren

Bei technologischen Prüfverfahren wird das Verhalten von Werkstoffen in kaltem oder warmem Zustand unter solchen Bedingungen geprüft, wie sie bei ihrer Verarbeitung oder auch bei ihrer Verwendung auftreten. Eine Kraftmessung erfolgt dabei nicht. Prinzipiell unterscheidet man Biegeproben, Schiedeproben, Schweißproben, Blechproben, Rohrproben, Verschleißproben, Zerspanungsproben und Bruchproben [20, 22]. Kennzeichnend für die technologischen Verfahren ist ihr im allgemeinen niedriger apparativer Aufwand.

Besonders einfach durchführbar und deshalb auch für den Schulversuch geeignet ist der Kaltversuch von Blechen. Man nimmt dazu eine etwa 1 mm dicke Blechprobe (Stahl, Aluminiumlegierung) mit den Abmessungen von etwa $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ und spannt sie bis zur Probenhälfte in einen Schraubstock. Dann wird das Blech vorgebogen, ausgespannt und in den freien Schenkeln in den Schraubstock so lange zusammengedrückt, bis sie aufeinanderliegen oder in der Hauptverformungszone Risse entstehen. Der letztgenannte Fall wird bei



kaltverformtem oder ausgehärtetem Blech auftreten. In weichgeglühtem Zustand wird in den meisten Fällen ein Zusammendrücken ohne Anrisse möglich sein.

5.3.5. Schnellprüfverfahren zur Werkstoffidentifizierung

5.3.5.1. Schleiffunkenanalyse

Dieses sogenannte Werkstattverfahren dient im wesentlichen der Analyse des Stahls. Zur einwandfreien Bestimmung eines Stahls sind eine gewisse Übung und entsprechende Vergleichswerkstücke notwendig. Das beim Schleifen entstehende Funkenbild wird beobachtet und ausgewertet (s. ausführlich [23]).

5.3.5.2. Tüpfelanalyse

Einige Tropfen verschiedener Reagenzien (zum größten Teil Säuren und Laugen) werden auf die Werkstückoberfläche aufgetragen. Die hervorgerufene chemische Reaktion wird beobachtet und ausgewertet. Die Tüpfelanalyse kann eine exakte chemische Analyse nicht ersetzen. Als Beispiel werden im folgenden einige Tüpfelanalysen für Leichtmetalle und Leichtmetalllegierungen genannt:

1. Ermittlung der Leichtmetallgattung

Man gibt einen Tropfen 20%ige Natronlauge auf ein kleines, blankes Stück der Oberfläche. Es lassen sich folgende Gruppen unterscheiden:

- keine Reaktion der Natronlauge mit der Oberfläche – es liegt reines Magnesium oder eine Magnesiumlegierung vor.
- Reaktion mit Gasblasenbildung – es liegt Aluminium oder eine Aluminiumlegierung vor.
Reaktionstropfen nach 5 bis 10 Minuten abwischen – bleibt ein weißer Fleck auf der Oberfläche, dann liegt Reinaluminium oder eine Cu-, Zn-, Ni-freie Legierung (meistens seewasserbeständige Al-Mg-Legierung) vor.

Bleibt nach Abtupfen mit Filterpapier ein abwischbarer, schwarzer Fleck, so ist Cu, Zn oder Ni in der Al-Legierung enthalten. Damit liegt eine aushärtbare Al-Legierung vor. Ist der dunkle Fleck auf der Oberfläche

nicht zu entfernen, so liegt eine Al-Si-Legierung vor (Si-Gehalt $\approx 1\%$). Anleitung für weitere Tüpfelanalysen s. [23].

5.3.5.3. Bestimmung der Plastart (vgl. [13])

Dichtemessung. Durch Bestimmung der Dichte läßt sich ein erster Anhalt gewinnen, wenn auch eventuelle Füllstoffe einen großen Einfluß ausüben können. Sie ist für

– Polyäthylen, Polypropylen (vgl. Übersicht 5.51.)	0,9 bis 1,0
– Polystyrol, unverstärkte Epoxidharze und Polyesterharze	1,0 bis 1,2
– Phenolharze	1,2 bis 1,4
– Viele verstärkte Plaste	1,5 bis 1,8
– Polytetrafluoräthylen	über 1,8

Verhalten beim Erhitzen und Anzünden. Angaben hierzu enthält für einige wichtige Plaste die Übersicht 5.66.

Sonstige Methoden. Weitere einfache Identifizierungsmöglichkeiten bestehen wie bei Metallen in der Beurteilung der Farbe und des sonstigen Aussehens (z. B. Sichtbarkeit von Gewebeeinlagen) und, z. B. bei der Unterscheidung von Polyäthylenen, in der Messung des Elastizitätsmoduls im Biegeversuch und dem Vergleich der Ergebnisse mit Bild 5.59.

5.4. Ökonomischer Materialeinsatz

Wie bereits in der Vorbemerkung hervorgehoben wurde, verfügt die moderne Technik über eine Vielzahl von Werkstoffen. Bei der industriellen Produktion kommt es darauf an, den Anforderungen gerade noch genügende Erzeugnisse mit dem niedrigstmöglichen Gesamtkostenaufwand herzustellen. Hierunter wird die Befriedigung aller kennzeichnenden Leistungsparameter und keine minderwertige Fertigung verstanden. Jedes technische Erzeugnis hat besondere Kriterien, die zu berücksichtigen sind.

Sieht man von einer sparsamen Materialverwendung in der Produktion, die hauptsächlich durch Senkung des Verschnitts erreicht wird, ab, so ist die Konstruktion die



Plast	Anzünden mit kleiner Flamme		Geruch der Schwaden beim Erhitzen oder nach Anzünden und Ablöschen
	Entzündung ¹	Art und Farbe der Flamme, sonstige Vorgänge	
Phenoplaste: Technische Harze Preßmassen	0 (I)	wenn I (dünne Proben, Schichtstoffe auch bis II) hell rußend, meist Ver- kohlung	Phenol, Formaldehyd, ggf. Ammoniak
Epoxidharze, ausgehärtet	II	leuchtend, rußend	zunächst wenig kenn- zeichnend, dann Phenol
Polyamide	II	bläulich, gelber Rand, tropft blasig und faden- ziehend	ähnlich verbranntem Horn
Polyäthylen und Polypropylen	II	leuchtend mit blauem Kern, tropft ab	
Polytetrafluoräthylen	0	brennt nicht, verkohlt nicht	bei Rotglut stechend (Flußsäure)
Polystyrol	II	leuchtend, stark rußend	typisch süßlich (Styrol)
Polyvinylchlorid-hart	I	grün, gesäumt, sprühend	Salzsäure mit typischem Beigeruch
Polyvinylchlorid-weich	I (II)	ggf. durch Weichmacher leuchtend	wie PVC-hart, Weich- machergerüche

¹ 0 = kaum entzündbar, I = brennt in der Flamme, erlischt außerhalb, II = brennt nach Entzündung weiter

Übersicht 5.66. Verhalten wichtiger Plaste beim Erhitzen und Anzünden als Mittel zur Werkstoffidentifizierung [13] (Auswahl)

maßgebliche Steuerzentrale für den ökonomischen Materialeinsatz. Wesentlich bei der Beurteilung ihrer Leistungen hinsichtlich der Kostensenkung durch die Verwendung anderer Materialien als bisher üblich ist der Umstand, daß die Werkstoffprüfung oft keine ausreichend sicheren Konstruktionkennziffern liefern kann und somit auf langjährige Versuchsmustererprobungen zurückgegriffen werden muß. Wichtig bei Werkstoffeinsatzentscheidungen sind die Berücksichtigung der Materialkosten, der Verarbeitungskosten (hier bieten Plaste besondere Vorteile, vgl. Abschnitt 5.2.1.2.) und nicht zuletzt der laufenden Bezugsmöglichkeit.

Die Realisierung der Forderung nach geringer Eigenmasse führt zu einem ökonomi-

schen Leichtbau, der sowohl durch Stoffleichtbau (Verwendung von Werkstoffen geringer Dichte) als auch durch Formleichtbau (optimale Ausnutzung der Werkstofffestigkeit durch entsprechende konstruktive Gestaltung) realisierbar ist.

Wird ein Werkstoff durch einen anderen ökonomisch ersetzt, dann spricht man von *Substitution*. Dabei ist die sogenannte *innere Substitution* der Austausch durch artgleiche oder ähnliche Werkstoffe, wie z. B. normalfester Stahl durch höherfesten Stahl. *Äußere Substitution* ist der Austausch durch andere Werkstoffgruppen, wie z. B. Stähle durch Plaste.

Normalerweise muß jede Substitution in ihrem Nutzen quantifizierbar sein. Das ist relativ einfach, wenn der Nutzen beim Her-



steller, z. B. durch Selbstkostensenkung, wirksam wird. Der Nachweis ist wesentlich schwieriger, wenn er beim Verbraucher oder Nutzer, z. B. in geringeren Treibstoffkosten bei Fahrzeugen, wirksam wird. Hier tritt für den Hersteller nur dann ein wirtschaftlicher Vorteil ein, wenn sich entweder das Erzeugnis entsprechend teuer verkaufen läßt (Nutzensteigerung) oder die Verbesserung aus Absatzgründen notwendig ist. Ein Beispiel für Wirtschaftlichkeitsabschätzungen bei innerer Substitution Stahl/Stahl zeigt Bild 5.67., wonach in Abhängigkeit von verschiedenen möglichen Preisrelationen und der Beanspruchung die optimale Streckgrenze für den Baustahl stark vereinfacht abgeleitet ist. Bei Euler-

scher Knickung (vgl. Seite 102) lassen sich höhere Streckgrenzen wegen des unveränderten Elastizitätsmoduls überhaupt nicht, bei reiner Zugbeanspruchung kommt die Streckgrenze am stärksten zum Tragen. Die Verwendung der Stahlmarke mit der optimalen Streckgrenze ergibt die größte Selbstkostensenkung.

An diesen Beispielen konnte nur ein erster Eindruck über die vielschichtigen Probleme, die der ökonomische Materialeinsatz beinhaltet, gegeben werden. Seine Lösung erfordert die enge Zusammenarbeit von Arbeitern, Technologen, Konstrukteuren, Ökonomen und Wissenschaftlern vieler Disziplinen.

5.5. Standards für Werkstoffe und Werkstoffprüfung

Chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Abmessungen und Lieferformen sind wesentliche Eigenschaftsmerkmale, die für die meisten metallischen Werkstoffe und mit Ausnahme der chemischen Zusammensetzung auch für nichtmetallische Werkstoffe in allen Industrieländern in Standards festgelegt sind. Dasselbe betrifft die anerkannten gebräuchlichen Werkstoffprüfverfahren und ihre praktische Durchführung. Einen für die Information ausgezeichneten Überblick über das umfangreiche Standardwerk auf diesem Gebiet vermitteln die TGL-Taschenbücher, die vollständige Abdrucke der einschlägigen Standards des betreffenden Gebietes enthalten.

Bei ihrem Gebrauch ist jedoch zu beachten, daß Veränderungen (Neuausgaben bzw. Änderungen bestehender Standards) nicht erfaßt werden. Die Informationsstellen für Standardisierung der Gesellschaft für Standardisierung in der Kammer der Technik erfassen sämtliche Veränderungen im Standardwerk der DDR und leihen im Bedarfsfall auch Standards aus, dasselbe gilt auch für die Büros für Standardisierung der Großbetriebe.

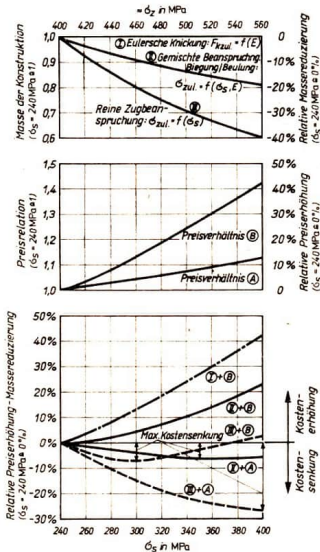


Bild 5.67. Materialkostenveränderung in Abhängigkeit von Streckgrenze, Preisrelationen und Beanspruchungsart für Baustähle (vereinfacht)



5.6. Weiterführende Literatur

5.6.1. Im Text verwendete Literatur

- [1] Schumann, H.: Metallographie. 5. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1964.
- [2] Althof, F. C.; D. Böhm; H. Spindler: Werkstoffe. In: W. Henschke: Schiffbautechnisches Handbuch. Band 5, 2. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin 1961.
- [3] Hansen, M.; K. Anderko: Constitution of Binary Alloys. 2. Auflage, McGraw-Hill Book Company, New York/Toronto/London 1958.
- [4] Schumann, H.: Ein neues Bauprinzip bei Eisenlegierungen mit Übergangsmetallen. Technik 23 (1968) H. 4, S. 247 ff.
- [5] Eisenkolb, F.: Einführung in die Werkstoffkunde. Band 1. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [6] Aluminium-Zentrale. Aluminium-Taschenbuch. 12. Auflage. Aluminium-Verlag, Düsseldorf 1963.
- [7] Tödt, W.: Metallkorrosion. 2. Auflage. W. de Gruyter & Co., Berlin 1958.
- [8] Wever, F.; A. Rose u. a.: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Verlag Stahl Eisen, Düsseldorf 1954, 1956, 1958.
- [9] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen. 4. Auflage. Verlag Stahl Eisen, Düsseldorf 1965.
- [10] Eisenkolb, F.: Einführung in die Werkstoffkunde, Band 3. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [11] Reutler, H.: Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen korrosionsträger Stähle. In: Atmosphärische Korrosion. „Aus der Zentralstelle für Korrosionsschutz“ 10, Dresden 1973.
- [12] Richtlinie für die Anwendung korrosionsträger Baustähle nach TGL 28 192, Stahlberatung II/76, Freiberg.
- [13] Saechtling, H.; W. Zebrowski: Kunststoff-Taschenbuch. 17. Ausgabe. Carl-Hanser-Verlag, München 1967.
- [14] Houwink, R.; A. J. Stavermann: Chemie und Technologie der Kunststoffe. 3. Auflage, Bd. II/1. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1963.
- [15] Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astrophysik und Technik. 6. Auflage. Band IV, Teil 1. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1955.
- [16] Göhre, K.: Werkstoff Holz. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1961.
- [17] Quak, K.: Technisches Wissen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [18] Agte/Kohlermann/Heymel: Schneidkeramik, Akademie-Verlag, Berlin.

- [19] Opitz, H.; W. Dude: Allgemeine Werkstoffprüfung für Ingenieurschulen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [20] Eisenkolb, F.: Einführung in die Werkstoffkunde, Band 2. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [21] Krist, T.: Werkstoffprüfung. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1952.
- [22] Michalzik, G.; F. Heidler; D. Böhm: Zerstörungsfreie Ermittlung der NDT-Temperatur des Drop-Weight-Testes aus Schallschwächungsmessungen. Schweißtechnik 26 (1976) H. 5, S. 208 ff.
- [23] Tschorn, G.: Schleiffunktenatlas. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1961.
- [24] Southwell, C. R.; B. W. Forgesoon; A. L. Alexander: Corrosion of Metals... Materials Protection 9 (1970) H. 1, S. 14 ff., und Corrosion 16 (1960) H. 3, S. 105 t ff.

5.6.2. Besonders empfehlenswerte Literatur¹

- Eckstein, H.-J.: Werkstoffkunde Stahl und Eisen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Beyer, B.: Werkstoffkunde NE-Metalle. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Schumann, H.: Metallographie. 5. Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Opitz, H.; W. Dude: Allgemeine Werkstoffprüfung für Ingenieurschulen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- Uhlig, H. H.: Korrosion und Korrosionsschutz. Akademie-Verlag, Berlin.
- Schatt, W.: Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaus. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- TGL-Taschenbuch: Stahl.
- Band I: Stabstahl und Profilstahl, warm gewalzt, technische Lieferbedingungen. Band I.
- Band II: Stabstahl und Profilstahl, warm gewalzt, Abmessungen: Bleche und Bänder.
- Band III: Stahlleichtprofile. Stahlrohre, Stabstahl und Stahldraht blank. Allgemeine Standards.
- TGL-Taschenbuch: NE-Metalle.
- Band I: Kupfer und Kupferlegierungen, Werkstoffe und Halbzeug.
- Band II: Leichtmetalle und Leichtmetalllegierungen. Werkstoffe und Halbzeug.
- Band III: Edelmetalle, Blei, Zinn, Zink und sonstige Schwermetalle, Werkstoffe und Halbzeug.
- TGL-Taschenbuch: Gießereien.
- TGL-Taschenbuch: Werkstoffprüfung (2 Bände).

¹ Es wurde nur das in der DDR verlegte Schrifttum angegeben.



6. Maschinenlehre

verfaßt von Dr.-Ing. H. Fuchs

Verwendete Formelzeichen

Die verwendeten Formelzeichen entsprechen den in Abschnitt 1 angeführten Maßeinheiten und Formelzeichen. Darüber hinaus werden außer den im Text festgelegten noch folgende Formelzeichen verwendet:

A, B	Auflagerkraft
p	Flächenpressung
c	Geschwindigkeit
W	Widerstandsmoment

Die verwendeten Indizes bedeuten:

erf	erforderlich
zul	zulässig
p	polar
z	axial
b	Biegung
t	Torsion
v	Vergleich

Vorbemerkung

Die Weiterentwicklung der Volkswirtschaft in der DDR in den nächsten Jahren steht ganz im Zeichen der von Partei und Regierung beschlossenen Weiterführung der Hauptaufgabe, das materielle und kulturelle Lebensniveau des Volkes auf der Grundlage eines hohen Entwicklungstempos der sozialistischen Produktion, der Erhöhung der Effektivität, des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und des Wachstums der Arbeitsproduktivität weiter zu erhöhen. Die entscheidende Grundlage für eine höhere Produktion und für verbesserte Arbeits- und Lebensbedingungen der Werktätigen ist die weitere Stärkung der materiell-technischen Basis der Volkswirtschaft [1].

Die Neu- und Weiterentwicklung von Geräten, Maschinen und Ausrüstungen für alle Zweige der Volkswirtschaft, der sich

ständig verbreiternde Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung in der Planung und Leitung aller gesellschaftlichen Bereiche und die zunehmende Anwendung von Geräten und Maschinen in der individuellen Lebenssphäre der Menschen erfordern die Einbeziehung der Maschinenlehre in die Allgemeinbildung gleichermaßen wie die der Naturwissenschaften. Damit widerspiegelt die Maschinenlehre die wachsende Bedeutung des Wissenschaftszweiges „Theorie der Maschinen und Mechanismen“ für die Automatisierung, für die Realisierung neuer technologischer Wirkungsprinzipien und überhaupt für die gesamte dem Wohle der Menschen dienende Technik. Sie schließt heute die Entwicklung von automatischen Geräten und Apparaturen ein, mit denen der Mensch in den Kosmos vordringt und die für ihn in schädlichen oder gefährlichen Zonen arbeiten, ebenso wie die Bereitstellung von Prothesen für menschliche Organe und Glieder. Die Fragen der Steuerung und der Zuverlässigkeit rücken dabei in den Vordergrund. Als Hauptprobleme von sozialer Bedeutung fließen ein die Reinhaltung der Umwelt, der Schutz des Menschen vor Lärm und anderen schädlichen Einflüssen sowie seine Befreiung von unzumutbaren oder entwürdigenden Tätigkeiten durch Maschinen oder Automaten. Das Ziel dieser Entwicklung ist die weitere Vervollkommen der technischen Mittel des Menschen zum Potenzieren seiner Kräfte.

Im vorliegenden Kapitel ist die Maschinenlehre für den polytechnischen Unterricht zugeschnitten. Sie unterscheidet sich in



ihrer Aufgabenstellung von der Maschinenkunde und Konstruktionslehre für Maschinenbauingenieure dadurch, daß sie an Stelle engumrissener spezieller Fragen allgemeintechnische Probleme und deren Lösungswege behandelt. Die Hauptaufgabe einer solchen Maschinenlehre besteht darin, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten herauszuarbeiten, die die engen Beziehungen der Technik zu den Naturwissenschaften, der Technologie und der Ökonomie charakterisieren. Durch diese Grundkenntnisse, besonders aber durch die Arbeitsmethoden, die bei der Aufdeckung solcher allgemeingültiger Gesetze angewandt werden, soll der Schüler die Fähigkeit erhalten, die ihm künftig als Produzenten anvertrauten technischen Systeme in ihrem Wesen zu erkennen, daraus die Grundzüge ihrer technischen Gestaltung abzuleiten und, wenn erforderlich, sie zu verbessern oder veränderten Betriebsbedingungen anzupassen.

Das Wissensfundament der Maschinenlehre bilden die Grundgesetze der Mechanik, der Festigkeitslehre, der Wärmelehre und der Technologie. Darauf aufbauend leitet sie von allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten die vielfältigen Möglichkeiten zur technischen Gestaltung des gleichen produktions-technischen Vorganges ab. Dieses Vorgehen erlaubt, alle neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Maschinenlehre einzu beziehen und sie zeitlich vorausschauend anwenden zu können.

An sie kann in der Berufsbildung jede fachspezifische Maschinenlehre anschließen.

6.1. Maschinentheorie

6.1.1. Wesen der Maschine

Die Weiterentwicklung der Menschheit und die Sicherheit ihrer Existenz wird durch die materiell-technische Basis bestimmt, die sich der Mensch zur Beherrschung der Natur und zur Nutzung ihrer Ressourcen geschaffen hat. Dabei nehmen die Maschi-

nen als wichtigstes Arbeitsmittel einen bedeutenden Platz ein.

Die gesellschaftliche Bedeutung der Maschinen liegt in den Produktionsverhältnissen begründet. In den feudalen und kapitalistischen Wirtschaftssystemen sind die Maschinen Privateigentum einiger weniger Menschen. Daraus ergeben sich Verhältnisse der Herrschaft und Unterdrückung, der Ausbeutung des Menschen durch den Menschen, der sozialen Unsicherheit und Abhängigkeit der Ausgebeuteten. Unter sozialistischen Produktionsverhältnissen sind die wichtigsten Maschinen gesellschaftliches Eigentum der Menschen, die sie bedienen. Als die gesellschaftlichen Besitzer dieser Produktionsmittel entscheiden sie, was und wieviel damit produziert wird und wie die erzeugten Güter verteilt werden. In der sozialistischen Planwirtschaft dienen die Produktionsmittel der steten Mehrung des gesellschaftlichen Reichtums im Interesse der Arbeiterklasse und aller anderen Werktätigen [2].

Überall im täglichen Leben treffen wir auf Maschinen. Maschinen wandeln die in der Natur vorkommenden Energiearten in technisch nutzbare Energieformen um. Die so bereitgestellte Energie nutzen Maschinen zur Gewinnung von Rohstoffen oder zur Herstellung von Produktionsmitteln, von Verbrauchs- oder Kulturgütern sowie von Nahrungs- und Genußmitteln. Maschinen begegnen uns im Haushalt, im Transportwesen und in der Informationsvermittlung im Nachrichtenwesen. Maschinen übernehmen die Datenverarbeitung in den Rechenzentren und sind in der Lage, ganze Werke zu kontrollieren und zu steuern. Sie können sogar Menschen die Lebensfähigkeit gewähren, indem sie die Funktionen einzelner menschlicher Organe übernehmen.

Durch die Umwandlung der Naturkräfte in technisch nutzbare Energie mittels Maschinen stehen den Menschen heute Energie reserven zur Verfügung, die millionenfach größer sind als ihre eigenen Muskelkräfte. Die Leistungsfähigkeit der Maschinen im



Produktionsprozeß ermöglicht hohe Arbeitsproduktivität, Selbstkostensenkung und Qualitätsverbesserung. Die Schnelligkeit und Präzision der Maschinen nutzt der Mensch auch zur Beherrschung von Prozessen, die schneller ablaufen, als er sie wahrnehmen kann. In diesen Eigenschaften der Maschinen zeigt sich ihr Wesen:

Maschinen potenzieren die körperlichen und die geistigen Kräfte der Menschen.

Mit dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt gehen Veränderungen in der strukturellen Formierung der Maschine und Erweiterungen ihrer Einsatzgebiete einher. Daraus resultiert eine ständige inhaltliche Weiterentwicklung der *Definition des Begriffs „Maschine“* nach den jeweils modernsten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Die derzeitigen Vorstellungen über eine verallgemeinerte Begriffsbestimmung für die Maschine lassen sich in folgender Aussage zusammenfassen:

Eine Maschine ist ein technisches System, das vom Menschen unter Anwendung der Naturgesetze zur Erleichterung der körperlichen und geistigen Arbeit und zur Erhöhung der Arbeitsproduktivität geschaffen wurde. Sie ersetzt teilweise oder vollkommen die menschliche Arbeit oder Funktionen der menschlichen Organe.

6.1.2. Einteilung der Maschinen

Als Kriterien der Eingliederung von Einzelmaschinen in ein Ordnungssystem der Maschinen dienen ihre Wirkungen und Einsatzgebiete in den Produktionsprozessen. Die Maschinen können *nach den mit ihnen erzielten Änderungen an Stoff, Energie und Information* eingeteilt werden in:

Energiemaschinen, die Naturkräfte in technisch nutzbare Energie umwandeln oder technisch nutzbare Energie von einer Erscheinungsform in eine andere umformen oder eine Energieart in eine andere umwandeln;

Arbeitsmaschinen, die Arbeit bei der Form-,

Eigenschafts- und Lageveränderung von Stoffen verrichten und dabei von Energiemaschinen oder durch Muskelkraft angetrieben werden;

Informationen verarbeitende Maschinen, die Informationen aufnehmen, weiterleiten, speichern und verarbeiten.

Nach ihren technologischen Aufgaben lassen sich die Maschinen ordnen in:

Maschinen für Energieumwandlungsprozesse, die eine Energieart in eine andere umwandeln, z. B. thermische Energie in mechanische;

Maschinen für Energieumformungsprozesse, die eine Energieform in eine andere umformen, z. B. Strömungsenergie in Druckwirkung (Bewegungsenergie in Lageenergie);

Maschinen für Stoffumwandlungsprozesse, die dazu dienen, die Eigenschaften von Stoffen zu ändern und Stoffstrukturen sowie Stoffzusammensetzungen umzuwandeln, z. B. durch Reduzieren, Oxydieren, Polymerisieren;

Maschinen für Stoffformungsprozesse, die dazu dienen, den Stoffen die gewünschte Form zu geben, z. B. durch Urformen, Umformen, Fügen, Trennen, Beschichten;

Maschinen für Transportprozesse, die der Ortsveränderung von Werkstoffen oder Erzeugnissen dienen, z. B. durch Heben, Verschieben, Fördern;

Maschinen für Landwirtschaftsprozesse, die mit biologisch tätigen Stoffen, wie Boden, Pflanzen, Tiere, pflanzliche und tierische Produkte, *Stoffformungs- und Transportprozesse* durchführen, z. B. Bodenbearbeitung, Düngung, Melioration, Säen, Pflanzen, Ernten, Pflanzenpflege, und -schutz, Futtermittelaufbereitung und -verteilung, Konservieren und Lagern, Entmistung, Milchgewinnung, Klimatisierung.

Eine weitere Einteilung der zu diesen Gruppen gehörenden Maschinen kann nach den ihren Funktionen zugrunde liegenden technologischen Grundverfahren und Wir-



kungsprinzipien erfolgen. In diesem Sinne werden die Maschinen im Produktionsprozeß in Abschnitt 6.3. behandelt.

6.1.3. Maschinenanalyse

Die *Maschinenanalyse* hilft, die Gesetzmäßigkeiten darzustellen, die den produktionstechnischen, den funktionellen und den konstruktiven Merkmalen einer Maschine eigen sind. Dadurch ermöglicht sie, den Aufbau und die Funktion dieser betrachteten Maschine sowohl als technisches System im Ganzen als auch in seinen Elementen zu erkennen und infolgedessen ihre Bedienung besser zu beherrschen.

6.1.3.1. Grundbegriffe der Maschinenanalyse

Die Stelle innerhalb einer Maschine, an der die produktionstechnischen Vorgänge ablaufen, wird als *Wirkungsstelle* bezeichnet. Dort wirkt das Arbeitsorgan unmittelbar auf den Arbeitsgegenstand ein und ändert dessen Form, Eigenschaft oder Lage.

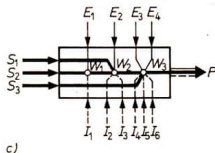
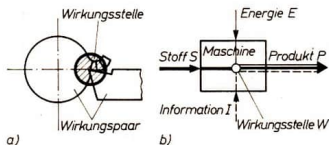
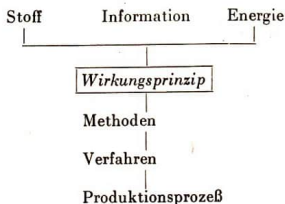


Bild 6.1. Wirkungsstelle in Maschinen

- a) Wirkungs paar und Wirkungsstelle in einer Drehmaschine
- b) Wirkungs schema von Maschinen mit einer Wirkungsstelle [3] und
- c) mit mehreren Wirkungsstellen [4]

Dabei bilden das Arbeitsorgan und der zu verändernde Stoff das *Wirkungspaar* (Bild 6.1.a). An der Wirkungsstelle entsteht im Zusammenwirken von Stoff, Energie und Information das Produkt als Ergebnis des Produktionsvorganges. In einer Maschine sind mehrere Wirkungsstellen mit mehreren und verschiedenen Wirkungspaaren möglich (Bild 6.1.c).



Übersicht 6.2.: Stellung des Wirkungsprinzips in der Struktur des Produktionsprozesses



Übersicht 6.3.: Stellung des Wirkungsprinzips in der Struktur der Produktionsmittel

Die *naturwissenschaftlich-technischen Gesetzmäßigkeiten*, die die Bedingungen für den Ablauf des produktionstechnischen Vorganges an der Wirkungsstelle kennzeichnen, werden *Wirkungsprinzip* genannt. Solche Wirkungsprinzipien sind beispielsweise das Überwinden des Stoffzusammenhaltes beim Trennen (wobei die äußere Energieeinwirkung größer sein muß als die innere Energie, die den Stoffzusammenhalt ausmacht) oder die Verbrennung bei der Umwandlung chemischer Energie in thermische Energie (wobei innere Energie infolge der



Änderung der Struktur und der chemischen Verbindung der beteiligten Stoffe als Wärme frei wird).

Ein und dasselbe Wirkungsprinzip kann in verschiedenen *Methoden* bei der Gestaltung produktionstechnischer Vorgänge verwendet werden. Die technische Anwendung der Methoden in den unterschiedlichsten Erscheinungsformen der Produktionsverfahren hängt stets von den bereitgestellten Energieformen in Verbindung mit den Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Stoffe und den genutzten technisch-funktionellen Gesetzmäßigkeiten ab. Unter Umständen kann der optimale Einsatz einer neuen Methode auch die Entwicklung neuer Stoffe mit dafür günstigen Eigenschaften erfordern, wie z. B. die Methode des stoffschlüssigen Fügens durch Hochfrequenzschweißen bei der Schuhherstellung.

Die mit den Methoden aufgebauten *Verfahren* sind immer ökonomischen Gesetzen und den über sie wirkenden gesellschaftlichen Einflüssen unterworfen. Diese Gesetze entscheiden über die Anwendbarkeit eines Verfahrens und optimieren damit den *Produktionsprozeß* (Übersicht 6.2.).

In den verschiedenen Maschinentypen für die Durchführung ein und desselben produktionstechnischen Vorganges zeigt sich die Vielfalt der Anwendbarkeit eines Wirkungsprinzips in einer Methode mit verschiedenen Wirkungsweisen. Die *Wirkungsweise* charakterisiert dabei die *technisch-funktionellen Gesetzmäßigkeiten*, die das Zusammenwirken von Stoff-, Energie- und Informationsfluß nach den Bedingungen des Wirkungsprinzips gewährleisten. Sie kennzeichnet den Ablauf der mechanischen Bewegungen (z. B. Arbeitsbewegung, Vorschub- und Zustellbewegung, Stofftransport), der Energieumsetzung, der Stoffumwandlungs- oder Formänderungsvorgänge. Die gleiche Wirkungsweise kann aber auch durch verschiedenartige *Wirkungsmechanismen* hervorgebracht werden, die völlig verschiedenen *technisch-konstruktiven Gesetzmäßigkeiten* unterliegen. So läßt sich

z. B. eine geradlinig hin- und hergehende Bewegung durch Zahnstangen, Kurbelschwingen, hydraulisch oder elektromagnetisch angetriebene Kolben oder Stößel erzeugen.

Die Aufeinanderfolge von Wirkungsmechanismen zur Realisierung der Wirkungsweise wird als *Wirkungskette* bezeichnet, die im Wirkungspaar an der Wirkungsstelle endet. Das Wirkungspaar wird mittels Trägerorganen in Arbeitsstellung gebracht. Dabei bilden das Trägerorgan und der zu bearbeitende Stoff zusammen das *Stützpaar*.

Die Anordnung aller Wirkungsmechanismen und Trägerorgane, die zur Durchführung eines produktionstechnischen Vorganges notwendig sind, ergeben schließlich als technisches System die Maschine, das *Produktionsmittel* (Übersicht 6.3. und Bild 6.4.).

6.1.3.2. Aufbau der Maschine

Jede Maschine kann nach funktionellen und konstruktiven Gesichtspunkten untergliedert werden. *Funktionell* lassen sich

Wirkungsprinzip	Trennen			
	Spanen			
Methode	Spanen			
Verfahren	Drehen	Hobeln	Fräsen	Bohren
Wirkungsweise				
Wirkungsmechanismen				

Bild 6.4. Wirkungsweise als Unterscheidungsmerkmal der Fertigungsverfahren



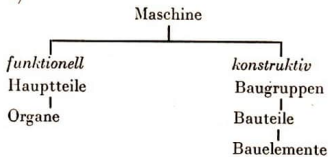
zwei Hauptteile unterscheiden, *Energieteil* und *Arbeitsenteil*. Automatische Maschinen und Maschinenfließreihen enthalten neben den Energieteilen und Arbeitsteilen der aggregierten Einzelmaschinen noch einen *Informationsteil*, der als Kommandomaschine wirkt und ebenfalls aus Energieteil und Arbeitsenteil besteht. In den Hauptteilen koordinieren *Organe* ihre Funktionen im Stoff-, Energie- und Informationsfluß der Maschine. Nach ihren Funktionen werden Arbeits-, Antriebs-, Anpassungs- und Trägerorgane unterschieden.

Nach *konstruktiven* Gesichtspunkten gliedert sich eine Maschine in *Baugruppen*, deren *Bauteile* und *Bauelemente*.

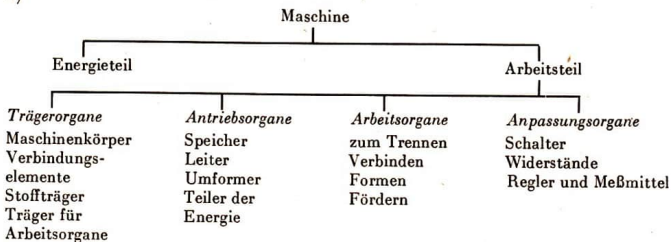
Übersicht 6.5.: Beispiele zur Maschinensystematik

- a) Funktionelle und konstruktive Gliederung einer Maschine
 b) Hauptteile und Organe einer Maschine [3]
 c) Zuordnung von Antriebs- und Anpassungsorganen zu den Wirkungsenergien (s. S. 172 f.) [3]

a)



b)



Zur Durchführung des produktionstechnischen Vorganges gelangt die zur Verfügung stehende Energie in das *Energieteil* der Maschine und erfährt dort die Umformung oder Umwandlung in die erforderliche Gebrauchsform. Der Energieteil ist meist selbst eine Energiemaschine (z. B. Elektromotor, Verbrennungsmotor). Die bereitgestellte Energie in der Gebrauchsform nutzt die Maschine im *Arbeitsenteil*. Dort befinden sich die *Arbeitsorgane* und die *Trägerorgane* sowie die *Antriebs-* und *Anpassungsorgane* der Maschine.

Vom Energieteil kommend, fließt die Nutzenergie über Antriebsorgane den Arbeitsorganen zu. Die *Antriebsorgane* dienen dabei als Leiter, Speicher, Umformer und Teiler der Energie. Die *Arbeitsorgane* setzen die eingeleitete Energie in Wirkungen am Stoff um (z. B. Form- oder Eigenschaftsänderung, Energieumformung). Zu den *Anpassungsorganen* gehören Schalter, Widerstände, Regler und Meßmittel, über die der Informationsfluß den Energiefluß oder Stofffluß oder beide gleichzeitig steuert. Schließlich geben die *Trägerorgane* der Maschine ihren inneren Zusammenhalt. Dazu gehören die Maschinenkörper (Gestelle, Träger), Verbindungselemente, Stoffträger und Träger für Arbeitsorgane.

Entsprechend ihren Funktionen lassen sich alle bekannten Bauelemente und Bauteile von Maschinen in diese Systematik einord-

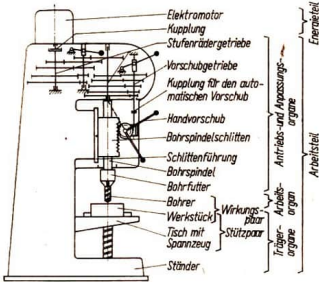


Bild 6.6. Hauptteile und Organe sowie Baugruppen und Bauteile einer Ständerbohrmaschine [3]

nen, gleich ob sie mechanisch, elektrisch, hydraulisch, pneumatisch oder optisch wirken. Diese funktionelle Ordnung gestattet gleichzeitig, von den Wissenschaften neu gefundene Bauelemente definitionsgerecht in die Systematik aufzunehmen.

6.1.3.3. Zusammenwirken von Bauteilen und Baugruppen in Maschinen

In technischen Zeichnungen wird der konstruktive Aufbau der Maschine mit ihren Baugruppen, Bauteilen und Bauelementen gezeigt (siehe Kapitel Technisches Zeichnen). Das Zusammenwirken der Organe oder Baugruppen im Funktionsablauf der Maschine läßt sich anhand einer *schematischen Darstellung* (Bild 6.7.), in einem *Funktionsschaltplan* (Bild 6.8.) und mit einem *Wirkungsschema* (Bild 6.9.) übersichtlich darstellen.

Vereinfachend werden die Bauteile oder Baugruppen mit standardisierten Symbolen oder Hauptteile und Organe als Blöcke gezeichnet, zwischen denen Linien die erforderlichen Verbindungen im Stoff-, Energie- und Informationsfluß aufzeigen. Diese Arten der Darstellung von Maschinen gestatten, den Funktionsablauf zu erkennen

und bieten gleichzeitig z. B. bei der Lösung von Rationalisierungsaufgaben die Möglichkeit, für die in den Blöcken oder Symbolen dargestellten Organe oder Bauteile die erforderlichen speziellen Ausführungen aus einer Anzahl von Varianten nach Optimierungsbedingungen auszuwählen.

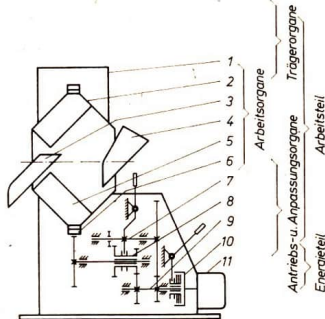


Bild 6.7. Schematische Darstellung einer Betonmischmaschine

1 Gestell; 2 Mischtrommel; 3 Auslauf; 4 Beschicker; 5 Mischrippen; 6 Trommelantrieb; 7 Vorgelege; 8 Schieberradgetriebe; 9 Getriebewelle mit Radpaar; 10 Schaltkupplung; 11 Motor

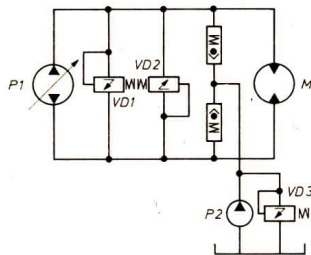
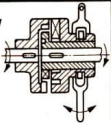
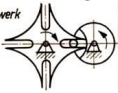



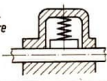
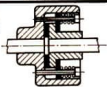

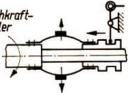



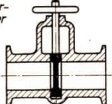
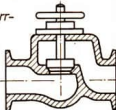



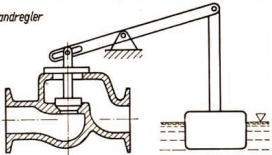
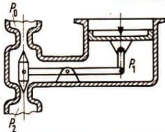








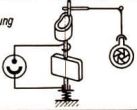


Bild 6.8. Funktionsschaltplan eines hydraulischen Getriebes



Energieform	Antriebsorgane			
	Speicher	Leiter	Umformer	Teiler
mechanisch	<p>Statisch</p> <p>Dynamisch Schwingmasse</p> <p>Kreisel</p> <p>Pendel</p> <p>Unruhe</p>	<p>Gestänge</p> <p>Welle</p> <p>Feste Kupplungen</p> <p>Ausgleichkupplungen</p> <p>Gelenke</p> <p>Räderpaare</p>	<p>Getriebe</p> <p>Rädergetriebe</p> <p>Zugmittelgetriebe</p> <p>Kurvengetriebe</p> <p>Kurbelgetriebe</p> <p>Schraubenge triebe</p>	<p>Rädergetriebe</p> <p>Kurbelgetriebe</p>
hydraulisch	<p>Hochbehälter</p> <p>Windkessel</p> <p>$\Delta P = h$</p>	<p>Kanal</p> <p>offen</p> <p>geschlossen</p> <p>Rohrleitung</p>	<p>Flüssigkeitswechselgetriebe</p> <p>Strömungsgetriebe</p>	<p>Kanalverzweigung</p> <p>Rohrverzweigung</p>
pneumatisch	<p>Druckgefäß</p> <p>ΔP</p>	<p>Rohrleitung</p>	<p>Druckluftkolbengetriebe</p>	<p>Rohrverzweigung</p>
elektrisch	<p>Akkumulator (elektrochemisch)</p> <p>Kondensator (kapazitiv)</p> <p>Spule (induktiv)</p> <p>Magnet</p>	<p>Elektrische Leitungen</p> <p>Elektronenstrahl</p>	<p>Transformator</p> <p>Gleichrichter</p> <p>Wechselrichter</p>	<p>Leitungsnetz</p> <p>Mehrsystemige Elektronenröhre</p>
optisch	<p>Phosphoreszenzleuchte</p> <p>Fluoreszenzleuchte</p>	<p>Lichtstrahl</p>	<p>Frequenzumformer</p> <p>Richtungs-umformer</p>	<p>Teilungsplatte</p>



Energieform	Anpassungsorgane		
	Schalter	Widerstände	Regler und Meßmittel
mechanisch	<p>Schaltkuppung</p>  <p>Schaltwerk</p>  <p>Hemmwerk</p> 	<p>Feststellgesperre</p>  <p>Richtgesperre</p>  <p>Hemmgesperre</p> 	<p>Rutschkuppung</p>  <p>Fliehkraftkuppung</p>  <p>Fliehkraftregler</p>  <p>Bandbremse</p>  <p>Stoßdämpfer</p>  <p>Bremsregler</p> 
hydraulisch	<p>Absperrschieber</p>  <p>Absperrventil</p>  <p>Absperrhahn</p> 	<p>Blende</p>  <p>Drosselklappe</p> 	<p>Füllstandregler</p>  <p>Druckregler</p> 
pneumatisch	<p>Absperrschieber</p> <p>Absperrventil</p> <p>Absperrhahn</p>	<p>Blende</p> <p>Drosselklappe</p>	<p>Druckregler</p>
elektrisch	<p>Drehschalter</p>  <p>Kippschalter</p> 	<p>Fester Widerstand</p>  <p>Regelwiderstand</p> 	<p>Elektrische Regler und Meßmittel aller Art</p>
optisch	<p>Zentralverschluss</p>  <p>Schlitzverschluss</p> 	<p>Blende fest</p>  <p>Blende verstellbar</p> 	<p>Automatische Blendeneinstellung (mit Fotozelle)</p> 

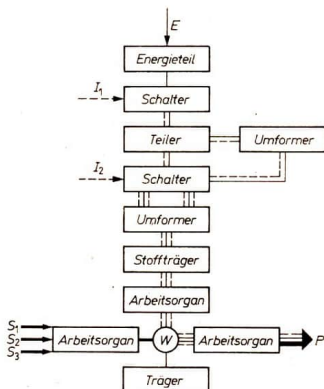


Bild 6.9. Wirkungsschema der Betonmischmaschine nach Bild 6.7. in Blockdarstellung
E Energie; I Information; S Stoff; P Produkt; W Wirkungsstelle

6.2. Bauelemente und Bauteile

6.2.1. Einteilung der Bauelemente und Bauteile

Die *Bauelemente* sind die kleinsten, konstruktiv nicht mehr zerlegbaren Bestandteile einer Maschine. Sie dienen hauptsächlich der mechanischen Kraftübertragung beim Abstützen oder Verbinden von Bauteilen sowie auch zur Fortleitung der mechanischen Energie. Diese Funktionen bedingen die Beanspruchung der Bauelemente durch äußere Kräfte und erfordern die Gegenwirkung genügend großer innerer Kräfte, der Festigkeiten der Bauelemente. Durch die Wahl der Konstruktion und des Werkstoffeinsatzes wird das Bauelement den technischen Anforderungen gerecht. Die Werkstofffestigkeit und die Gestaltfestigkeit bestimmen gemeinsam seine Belastbarkeit. Es werden unterschieden:

Bauelemente

- zum Abstützen von Bauteilen
- zum Verbinden von Bauteilen
- zur Fortleitung mechanischer Energie

Die *Bauteile* einer Maschine bestehen aus zwei oder mehreren Bauelementen. Sie führen im Stoff- und Energiefluß komplizierte Funktionen aus, z. B. das Umformen und Speichern mechanischer Energie, das Schalten und Regeln des mechanischen Energieflusses oder das Tragen der Werkstoffe und Werkzeuge.

Die Maschinen enthalten die Bauteile demnach als Antriebs-, Anpassungs-, Arbeits- und Trägerorgane. Ihre Konstruktion muß den möglichen Beanspruchungen gerecht werden, wird aber hauptsächlich durch den oft komplizierten Funktionsablauf vorgeschrieben. Es werden unterschieden:

Bauteile

- zum Umformen mechanischer Energie
- zum Speichern mechanischer Energie
- zum Schalten und Regeln des mechanischen Energieflusses
- als Widerstände im mechanischen Energiefluß
- als Werkstoff- und Werkzeugträger

Sowohl bei den Bauelementen als auch bei den Bauteilen kann die gleiche geforderte Funktion mit verschiedenen technischen Mitteln erreicht werden. Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit entscheiden in der Hauptsache, welches davon verwendet wird. Diese Faktoren müssen innerhalb einer Maschine aufeinander abgestimmt sein und sollen für alle Bauelemente und Bauteile in der gleichen Größenordnung liegen. Außer den funktionstechnischen Faktoren beeinflussen natürlich auch technologische und ökonomische die Auswahl. Die moderne Produktion fordert die Massenfertigung von standardisierten austauschbaren Einzelteilen, die ohne Nacharbeit in Maschinen eingebaut werden können. Solche Teile sind billig und in verschie-



dene technische Systeme einsetzbar. Bei auftretenden Störungen im Einsatz der Maschinen, z. B. durch Verschleiß oder Zbruchgehen eines solchen Teiles, kann das austauschbare Teil schnell ausgewechselt werden. Dabei verringern sich die Reparatur- und Stillstandszeiten der Maschinen. Zum Austausch solcher Teile sind meist keine Spezialisten erforderlich.

Das Prinzip der Austauschbarkeit von Bauelementen und Bauteilen findet verstärkt bei allen Maschinenarten Anwendung. Dabei werden vielfach Bauelemente und Bauteile innerhalb eines Maschinenorgans zusammengefaßt, die sogar austauschbar für mehrere Maschinentypen sein können. Nach gleichen Funktionen bei der Anwendung verschiedener Energieformen lassen sich alle Bauelemente und Bauteile in die Maschinensystematik nach Abschnitt 6.1.3.2. einordnen.

6.2.2. Bauelemente zum Abstützen von Bauteilen

In allen Maschinen müssen Bauelemente oder Bauteile in einer bestimmten Lage gehalten oder es müssen ihnen in bestimmten Lagen zwangsläufige Bewegungen ermöglicht werden. Diese Funktion üben die Stützelemente aus. Dabei leiten sie Kräfte von den auf ihnen lastenden Bauteilen weiter. Diese Kräfte lösen Spannungen aus, die in der Festigkeitslehre als Längskräfte, Querkkräfte und Momente dargestellt werden. Die Belastungen verursachen die Beanspruchungen des Bauelementes auf Zug, Druck, Schub, Biegung, Knickung oder Drehung (s. Abschnitt 3.2.2.), die in den Querschnitten entsprechende Zugspannungen usw. hervorrufen. Diese Spannungen dürfen die zulässigen Festigkeitswerte des Werkstoffes, aus dem das Bauelement gefertigt ist, nicht überschreiten, da es sich sonst über die zulässigen Grenzen verformen oder gar zu Bruch gehen würde. Die zulässigen Festigkeitswerte hängen vom Werkstoff und von der Art der Belastung ab.

Zu den Stützelementen gehören ihrer Funk-

tion nach die Maschinengestelle, Träger, Achsen, Zapfen, Lager und Führungen.

6.2.2.1. Maschinengestelle

Die Maschinengestelle müssen sowohl die Massenkräfte der sie belastenden ruhenden und bewegten Bauteile aufnehmen als auch die im Ablauf des Produktionsvorganges entstehenden Kraftwirkungen. Sie müssen demnach statischen und dynamischen Beanspruchungen standhalten.

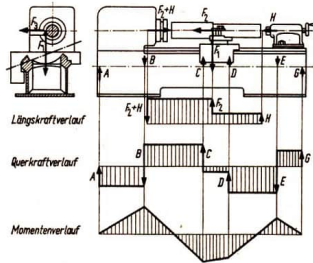


Bild 6.10. Beispiel der Belastung eines Drehmaschinenbettes (schematische Darstellung der Belastungskennlinien; A, B, C, D, E und G sind Querkkräfte, F_1 und H sind Längskräfte)

Bild 6.10. zeigt die beim Spanabhebevorgang auftretenden Kräfte $F_{1,2,3}$ und H an einer Drehmaschine. Zusammen mit den Massenkräften rufen sie im Gestell der Maschine die Reaktionskräfte A, B, C, D, E und G hervor (auf die Schwerachse bezogen). Die schematisch dargestellten Belastungskennlinien lassen die Wirkung der Querkkräfte und der Momente über das gesamte Gestell sowie ihre Größenordnungen erkennen. Durch die konstruktive Gestaltung des Gestells müssen Durchbiegung, Verdrehung und Schwingungsverhalten in zulässigen Grenzen bleiben, d. h., das Gestell muß eine ausreichende statische und dynamische Steifigkeit erhalten.

6.2.2.2. Träger

Träger unterliegen den Belastungen ebenso wie die Maschinengestelle. Sie sind neben



Verbiegungen und Verdrehungen meist auf Scherung beansprucht. Die Biegebeanspruchung erfordert dabei größere Festigkeitswerte des Bauelements.

Profil					
$A \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$	8	22,3	176	44	170
$J_x \cdot 10^{-4} \text{ mm}^4$	8	22,3	176	44	170
$W_x \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$	4,5	36	53	8	34

Bild 6.11. Trägheits- und Widerstandsmomente bei verschiedenen Trägerprofilen mit annähernd gleichen Querschnittsflächen

Durch Trägerprofile mit einem großen Widerstandsmoment kann der Werkstoff am besten ausgenutzt werden. Hierzu zeigt Bild 6.11. den elliptischen Querschnitt als den mit der größten Biegesteifheit. Jedoch hat im praktischen Einsatz der I-Träger auf Grund seiner niedrigen Fertigungskosten den Vorrang. Zur Berechnung des Widerstandsmomentes siehe Technische Mechanik, Seite 99 ff.

6.2.2.3. Achsen

Die Achsen stützen Räder, Hebel oder sonstige um sie drehende Bauteile ab. Sie übertragen in ihrer Längsrichtung kein Drehmoment und sind deshalb unter der Einwirkung von Querkraften nur auf Biegung und Abscherung beansprucht.

Berechnung

Auflagerkräfte zur Belastung in Bild 6.13.:

$$A = \frac{F \cdot b}{l}; \quad B = \frac{F \cdot a}{l} \quad \text{in N.}$$

Zulässige Biegefestigkeit:

$\sigma_b \text{ zul}$ in MPa aus Tabellen.

Größtes Biegemoment:

$$M_{b \max} = \frac{F \cdot a \cdot b}{l} \quad \text{in Nm.}$$

Erforderliches Widerstandsmoment:

$$W_{\text{ert}} = \frac{M_b}{\sigma_{b \text{ zul}}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad \text{in mm}^3.$$

Achsendurchmesser:

$$d_{\text{ert}} = \sqrt[3]{\frac{32 W_{\text{ert}}}{\pi}} \quad \text{in mm.}$$

Gewählt wird der nächstgrößere Normdurchmesser!

Siehe auch Technische Mechanik, Seite 102 f.

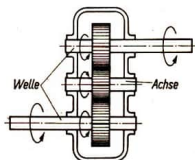


Bild 6.12. Welle und Achse in einem Stirnradgetriebe

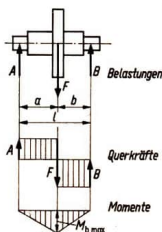


Bild 6.13. Kraftwirkungen an einer Achse

6.2.2.4. Zapfen

Die Zapfen stützen Achsen, Wellen oder besondere Maschinenteile ab und übertragen dabei Kraftwirkungen auf Lagerstellen. Je nach der Kraftübertragung als Querkraften oder Längskräfte unterscheidet man Tragzapfen oder Spurzapfen.

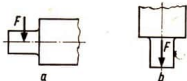


Bild 6.14. Arten der Zapfen: a Tragzapfen, b Spurzapfen

Die Tragzapfen können je nach ihrer Anordnung entweder am Ende einer Achse oder Welle als Stirnzapfen oder zwischen den Enden als Halszapfen gestaltet sein. Zur Übertragung von Querkraften und mittleren Längskräften eignen sich Kegelzapfen. Der einfachste Spurzapfen ist der ringförmige Spurzapfen. Zur Übertragung größ-



ter Längskräfte dient der Kammzapfen. Eine Winkelbeweglichkeit ist beim kugelförmigen Spurzapfen gegeben.

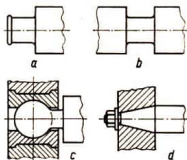


Bild 6.15.
Formen der Tragzapfen: a) Stirnzapfen, b) Halszapfen, c) Kugelzapfen, d) Kegelzapfen

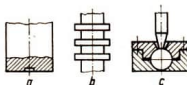


Bild 6.16.
Formen der Spurzapfen: a) ringförmiger Spurzapfen, b) Kammzapfen, c) kugelförmiger Spurzapfen



Bild 6.17.
Skizze zur Berechnung eines Tragzapfens

Berechnung von Tragzapfen

Zapfenverhältnis:

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{0,2 \sigma_{b \text{ zul}}}{p_{\text{zul}}}}$$

l = Länge des Zapfens; p_{zul} in MPa aus Tabellen.

Biegemoment:

$$M_b = F \cdot \frac{l}{2} \quad \text{in Nm.}$$

Widerstandsmoment:

$$W_b = \frac{M_b}{\sigma_{b \text{ zul}}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \approx 0,1 d^3 \quad \text{in mm}^3.$$

Zapfendurchmesser:

$$d = \sqrt[3]{\frac{F \cdot l}{0,2 \cdot \sigma_{b \text{ zul}}}}; \quad d = \sqrt{\frac{F}{\frac{l}{d} \cdot p_{\text{zul}}}}$$

Zur Verringerung von Kantenpressungen ist das Zapfenverhältnis klein zu halten, $l = d$ ist anzustreben.

Als Erfahrungswert gilt: $\frac{l}{d} = 0,4$ bis $1,0$.

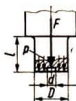


Bild 6.18.
Skizze zur Spurzapfenberechnung

Berechnung von Spurzapfen

Flächenpressung:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} \quad \text{in MPa.}$$

A = tragende Fläche

Zapfendurchmesser:

$$D = \sqrt{\frac{4 F}{\pi \cdot p_{\text{zul}}} + d^2}$$

6.2.2.5. Lager

Auf Lager stützen sich die Zapfen von Achsen, Wellen und anderen Maschinenteilen ab. Dabei nehmen sie die von den Zapfen übertragenen Kraftwirkungen auf. Gleichzeitig begrenzen die Lager die Bewegungsfreiheit der Maschinenteile in radialer und axialer Richtung. Nach der Richtung der Kraftaufnahme werden die Lager unterschieden in *Querlager* für Radialkräfte und in *Längslager* für Axialkräfte. Beide können entweder als Gleitlager oder als Wälzlager ausgeführt sein. Im *Gleitlager* gleitet der Zapfen auf der Lagerfläche, im *Wälzlager* rollt der Zapfen auf zwischen dem Außenring und Innenring liegenden Wälzkörpern ab. Je nach der geometrischen Form der Wälzkörper unterscheidet man Kugellager, Zylinderrollenlager, Nadellager, Kegelrollenlager und Tonnenrollenlager. Sowohl auf den Gleitflächen im Gleitlager als auch auf den Rollbahnen der Wälzlager entsteht Reibung und damit Verschleiß. Beides wird wesentlich durch die Oberflächenbeschaffenheit und durch die Schmierung beeinflusst. Die Gleitflächen und Rollbahnen müssen deshalb feinstbearbeitet sein. Zur Verminderung der Reibung werden diese Flächen mit einem Öl- oder Fettfilm überzogen (geschmiert).

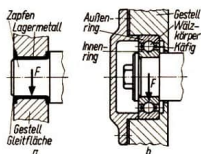


Bild 6.19.
Querlager: a Gleitlager, b Wälzlager

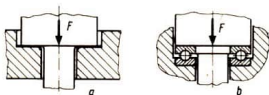


Bild 6.20.
Längslager: a Gleitlager, b Wälzlager

Es erfolgt Fettschmierung bei geringen Gleitgeschwindigkeiten und hohen örtlichen Flächenpressungen, Ölschmierung bei hohen Geschwindigkeiten.

Wälzlager zeichnen sich aus durch geringen Reibungswiderstand, anspruchslose Wartung, genaue Führung und hohe Lebensdauer. Sie sind standardisiert und werden als Normteile behandelt.

Gleitlager haben folgende Vorteile gegenüber Wälzlager: Schmierschicht wirkt schwingungs-, geräusch- und stoßdämpfend. Sie sind weniger schmutzempfindlich, einfacher im Aufbau und geteilt anwendbar sowie bei großen Durchmessern erheblich billiger als Wälzlager. Nachteile gegenüber Wälzlager sind der größere Anlaufreibwiderstand, mehr Verbrauch an Schmierstoff, mehr Aufwand an Wartung für sichere Schmierung.

6.2.2.6. Führungen

Die Führungen gestatten Maschinenteilen, nur zwangsläufige Bewegungen auszuführen, nur gerad- oder krummlinig sein können. Sie nehmen dabei Führungskräfte auf, die durch Richtungsänderung der Massenkkräfte (z. B. Fliehkraft) oder als Reaktionskräfte wirksam werden.

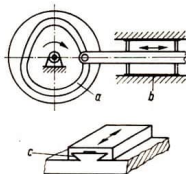


Bild 6.21.
Führungen: a Kurvenführung, b Geradföhrung, c Schwalbenschwanzführung

6.2.3. Bauelemente zum Verbinden von Bauteilen

Die Verbindungselemente dienen zum Zusammenfügen oder Befestigen von Einzelteilen oder Baugruppen in einer Maschine. Nach der Art und Weise der Kraftübertragung werden sie unterteilt in stoffschlüssige, formschlüssige und kraftschlüssige Verbindungen.

6.2.3.1. Stoffschlüssige Verbindungen

Die stoffschlüssigen Verbindungen entstehen durch *Schweißen*, *Löten* und *Kleben*. Bei diesen Verbindungen werden die Teile durch die Werkstoffvereinigung unter der Einwirkung von Kohäsions- und Adhäsionskräften zusammengefügt. Bauelemente kommen dabei nicht in Anwendung. An ihrer Stelle erscheinen die Schweißnaht, die Lötfläche und die Klebfuge.

Schweißverbindungen werden in der Metall- und Kunststoffverarbeitung angewandt.

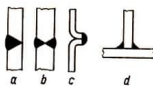


Bild 6.22.
Schweißnahtformen: a V-Naht, b X-Naht, c Bördelnaht, d Doppelkehlnaht

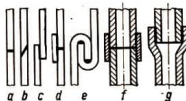


Bild 6.23. Lötverbindungen: a gerader Stumpfstoß, b schräger Stumpfstoß, c Überlappstoß, d Laschenstoß, e Falzstoß, f Rohrverbindungen durch Muffe, g Rohrverbindungen durch Aufweitung

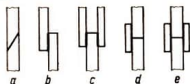


Bild 6.24. Klebverbindungen: a Schäftung, b einfache Überlappung, c doppelte Überlappung, d einfache Laschung, e doppelte Laschung

Die Verbindung der Teile erfolgt durch Erstarren des an der Nahtstelle vorher unter Wärme-, Wärme- und Druck- oder nur Druckeinwirkung geschmolzenen Werkstoffes. In den meisten Fällen bildet ein eingeschmolzener Zusatzwerkstoff die Naht (Bild 6.22. a, b und d).

Schweißkonstruktionen sind erheblich leichter als gegossene oder genietete Bauteile. Getriebekästen, Hebel, Zahnräder usw. können in geschweißter Ausführung bis 50 % leichter sein als in gegossener Konstruktion, Stahlbaukonstruktionen sind geschweißt etwa 15 % bis 20 % leichter als genietete.

Nachteilig auf die Kraftübertragung wirken sich die Strukturveränderungen im Werkstoff der zu verbindenden Teile in unmittelbarer Nähe der Schweißstelle aus. Dadurch tritt dort eine Festigkeitsverminderung ein. Bei unsachgemäßer Behandlung können thermische Spannungen auftreten, die eine zusätzliche Beeinträchtigung der Festigkeit hervorrufen.

Berechnung

Spannung in Schweißnaht ϱ_1 (in MPa) bei Beanspruchung auf Zug, Druck oder Schub:

$$\varrho_1 = \frac{F}{a_1 \cdot l_{n1} + a_2 \cdot l_{n2} + \dots + a_k \cdot l_{nk}} \leq \varrho_{zul}$$

a = Nahtdicke in mm

l_n = nutzbare Nahtlänge in mm

l = Nahtlänge in mm

ϱ_{zul} = zulässige Spannung in der Naht in MPa

Nutzbare Nahtlänge bei geschlossenen, umlaufenden Nähten $l_n = l$, bei offener Naht werden Anfangs- und Endkrater abgezogen $l_n = l - 2a$.

Spannung ϱ_2 bei Biegung:

$$\varrho_2 = \frac{M_b}{W_n} \leq \varrho_{zul}$$

W_n = Widerstandsmoment des Nahtquerschnittes im Abstand e

e = Abstand der Naht von der Schwerlinie

Beanspruchung auf Schub und Biegung:

$$\varrho = \sqrt{\varrho_1^2 + \varrho_2^2} \leq \varrho_{zul}$$

Beanspruchung auf Verdrehung

$$(\text{Torsionsbeanspruchung}): \varrho = \frac{M_t}{W_t} \leq \varrho_{zul}$$

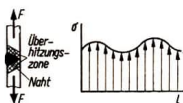


Bild 6.25. Ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Schweißnahtlänge durch überlagerte Schweißspannungen infolge thermischer Spannungen und Strukturveränderungen in der Nahtquerschnitt und in der Überhitzungszone

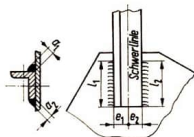


Bild 6.26. Skizze zur Festigkeitsberechnung der Schweißverbindung

Lötverbindungen werden für geringe Kraftübertragung durch Weichlöten (Lotschmelzpunkt bis 300 °C) und für größere Kräfte oder höhere Gebrauchstemperaturen durch Hartlöten (Lotschmelzpunkt über 600 °C) hergestellt. Die Verbindung der Teile erfolgt durch eine flüssig eingebrachte und nach dem Erstarren haftende Metallschicht, das Lot. Die Kraftübertragung bewirken Adhäsionskräfte und teilweise auch Kohäsionskräfte, die zwischen den Lötflächen der

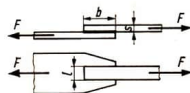


Bild 6.27. Skizze zur Festigkeitsberechnung der Lötverbindung



Teile und dem Lot sowie durch Diffusion des Lotwerkstoffes in das Werkstück wirken.

Berechnung

In der Lötfläche $A = b \cdot l$ ist die Schubspannung τ_L bei zu übertragender Kraft F :

$$\tau_L = \frac{F}{b \cdot l} \leq \tau_{Lzul} \quad \text{in MPa.}$$

Der Bauteilquerschnitt $l \cdot s$ ergibt sich aus F und der zulässigen Spannung σ_{zul}

$$l \cdot s = \frac{F}{\sigma_{zul}}; \text{ dann wird die Lötflächenlänge}$$

$$l = \frac{\frac{F}{\sigma_{zul}}}{s} = \frac{F}{s \cdot \sigma_{zul}}$$

b = Breite der Lötfläche in mm

l = Länge der Lötfläche in mm

s = Bauteildicke in mm

Über die Schubspannung τ_L läßt sich die Lötflächenbreite berechnen zu

$$b = \frac{s \cdot \sigma_{zul}}{\tau_L};$$

Kleilverbindungen nutzen die große Haftfestigkeit bestimmter Kunstharze und deren gute mechanische Eigenschaften zur Kraftübertragung.

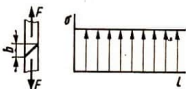


Bild 6.28. Gleichmäßige Spannungsverteilung über die Länge der Kleilverbindungen

Bei Zugbeanspruchung zeigt sich über die Länge der Kleifuge eine gleichmäßige Spannungsverteilung. Es treten gegenüber dem Schweißen keine nachteiligen Strukturänderungen im Werkstoff oder thermische Spannungen infolge Wärmeeinwirkungen auf.

Die übertragbare Kraft F ergibt sich für eine Bindefläche $b \cdot l$ bei einer zulässigen Scherfestigkeit τ_{zul} des Klebstoffes zu

$$F = b \cdot l \cdot \tau_{zul}.$$

6.2.3.2. Formschlüssige Verbindungen

Die formschlüssigen Verbindungen übertragen Kräfte von einem Bauteil auf ein anderes durch den Formwiderstand. Dieser kann hervorgebracht werden durch eine entsprechende Oberflächengestaltung der Bauteile an der Verbindungsstelle oder durch das Einbringen anderer Körper (Bild 6.29.).

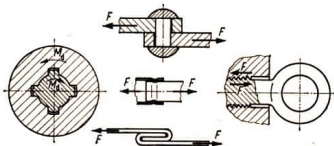


Bild 6.29. Bei formschlüssigen Verbindungen ermöglicht der Formwiderstand die Kraftübertragung

Beispiele formschlüssiger Verbindungsarten sind Niet-, Stift-, Feder- und Schraubverbindungen sowie Bördel- und Sickenverbindungen.

Nietverbindungen. Eine typische formschlüssige Verbindung ist die im Stahlbau übliche Nietverbindung. Der Formschluß wird durch den Nietschaft gewährt. Setzkopf und Schließkopf halten den Schaft in der eingebrachten Lage zwischen den zu verbindenden Bauteilen fest. Diese Nietverbindung dient zur Übertragung großer Kräfte. Nachteilig ist bei diesen Verbindungen besonders die Schwächung der Querschnittsfläche um 15 % bis 45 %. Durch die Nietlöcher wird in den belasteten Querschnitten eine Kerbwirkung verursacht, die Spannungsspitzen im Werkstoff an den Nietlochrändern zur Folge hat.

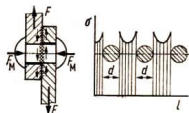


Bild 6.30. Spannungsverteilung längs einer Nietreihe (Spannungsspitzen an den Nietlochrändern)



Durch das Anschlagen des Schließkopfes werden die Bauteile aufeinandergedrückt. Der dadurch an den Berührungsflächen entstehende Reibungswiderstand dient ebenfalls der Kraftübertragung.

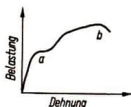


Bild 6.31. Belastungslinie einer Nietverbindung: bei a Überschreitung des Reibungswiderstandes, bis b Überwindung des Formwiderstandes und schließlich Abscherung

Berechnung

Reibungswiderstand W_R :

$$W_R = F_n \cdot \mu_0 = \sigma_n \cdot A_n \cdot \mu_0 \quad \text{in N.}$$

F_n = Preßkraft in N

σ_n = Zugspannung im Schaft in MPa

A_n = Schaftquerschnitt in mm²

μ_0 = Haftreibungskoeffizient

Formwiderstand F_w :

$$F_w = \tau_a \cdot A_n.$$

τ_a = Scherfestigkeit in MPa

Der Formwiderstand entspricht der Scherkraft und wird oft als Scherwiderstand bezeichnet.

Bei Berechnung der Nietverbindung auf Abscherung wird der Reibungswiderstand vernachlässigt, da er nicht immer mit Sicherheit vorhanden ist.

Zur Übertragung einer Kraft F ist bei einer zulässigen Scherfestigkeit τ_{zul} des Nieten eine Nietquerschnittsfläche A notwendig von

$$A = \frac{F}{\tau_{zul}}.$$

Bei mehrfacher Nietung ist A die Summe aller auf Abscherung beanspruchten Nietquerschnittsflächen. Zur Vergrößerung von A wird beispielsweise die Doppellaschen-nietung verwendet.

Stiftverbindungen. Stiftverbindungen sind zur Lagensicherung von Maschinenteilen sehr verbreitet, z. B. Haltestifte oder Paßstifte. Während Kegelstifte und Zylinderstifte genau in die Bohrungen eingepaßt werden müssen, geben Kerbstifte eine billige Verbindung ab.

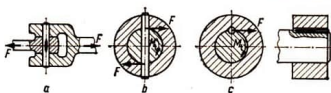


Bild 6.32. Anwendungsbeispiele für Stiftverbindungen: a Kurbelstift als Gelenkstift, b Querstift zur Übertragung eines Drehmomentes, c Längsstift zur Befestigung eines Radkörpers auf einer Welle

Federverbindungen. Federn dienen hauptsächlich zur Verbindung von Wellen und Radnaben. Verwendet werden zum Beispiel Scheibenfedern und Paßfedern, wenn Teile genau rundlaufen müssen und keine radiale Kraftwirkung haben dürfen, wie z. B. Keilverbindungen (siehe Abschnitt 6.2.3.3.).

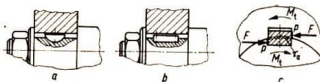


Bild 6.33. Anwendungsbeispiele für Federverbindungen: a Scheibenfeder, b Paßfeder, c Beanspruchung der Feder auf Abscherung τ_a und Flächenpressung p

Schraubverbindungen. Befestigungsschrauben dienen zur Übertragung von Längs- und Querkraften. Bei Beanspruchung durch Längskräfte entstehen Zugspannungen im Schraubenbolzen und Scherspannungen in den Gewingegängen (Dehnschraube). Die Zugbeanspruchung wirkt nur über den Kernquerschnitt des Gewindes mit dem Durchmesser d . Die Scherbeanspruchung τ_a wirkt auf den Gewindegrund. Gleichzeitig beansprucht die Schubkraft die Flankenflächen des Gewindes auf Flächenpressung p .

Querbelaastete Schrauben (Paßschrauben) haben zwischen Schaft und Bohrung kein

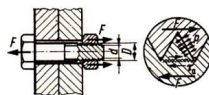


Bild 6.34. Beanspruchung einer Schraubverbindung durch Längskraft F



Spiel. Mit Querkraften wird der Schaft-
querschnitt beansprucht. Zwischen Bohrung
und Schaft tritt noch eine Flächenpressung
auf.

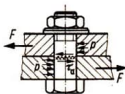


Bild 6.35.
Beanspruchung einer Schraub-
verbindung durch Querkraft F

Berechnung

Durch Längskraft belastete Befestigungs-
schraube:

Zugspannung im Kernquerschnitt A_K :

$$\sigma = \frac{F}{A_K}; \quad A_K = \frac{d^2 \pi}{4}.$$

Erforderlicher Kerndurchmesser:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \sigma_{zul}}}.$$

Flächenpressung auf der Flankenfläche A_t :

$$p = \frac{F}{A_t} \quad \text{in MPa.}$$

Gesamte Flankenfläche aller tragenden Ge-
windegänge i :

$$A_t = (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot i,$$

demnach ist

$$p = \frac{4 \cdot F}{(D^2 - d^2) \pi \cdot i}.$$

Gewindeaußendurchmesser:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{p \cdot \pi \cdot i} + d^2}.$$

Übertragbare Kraft F :

$$F = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot \sigma_{zul} = (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot i \cdot p_{zul}.$$

Anzahl der erforderlichen Gewindegänge i :

$$i = \frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot \frac{\sigma_{zul}}{p_{zul}}.$$

Erforderliche tragende Gewindelänge m :

$m = h \cdot i$, wobei h die Gewindesteigung ist.

Berechnung der Schubspannung τ_a :

$$\tau_a = \frac{F}{A_a} = \frac{F}{0,85 h \cdot \pi \cdot d \cdot i} \leq \tau_{a,zul},$$

wobei $0,85 h$ den Eingriff der Flanke infolge
Abrundung berücksichtigt und A_a die ge-
samte Abscherfläche in mm^2 bedeutet, die
mit F in N belastet wird.

6.2.3.3. Kraftschlüssige Verbindungen

Bei den kraftschlüssigen Verbindungen er-
folgt die Übertragung von Kraftwirkungen
entweder durch Reibungswiderstand (Längs-
keilverbindung) oder durch elastische Ver-
spannung der Teile gegeneinander (Preß-
und Schrumpferverbindungen).

Längskeilverbindung. Durch Einschlagen
des Längskeiles mit der Kraft F_s in eine
Nut mit einer bestimmten Neigung (1:100)
entsteht an dessen Bauch- und Rücken-
fläche eine Flächenpressung p_n .

Da die Nabe mit etwas Spiel auf der Welle
sitzt, wird diese Verbindung geringfügig
exzentrisch.

Mit einer Haftreibungszahl μ_0 , der Sitz-
länge l und dem Wellendurchmesser d kann
bei einer Flächenpressung p zwischen Welle
und Nabe (gegenüberliegend vom Keil) eine
Kraft F_t übertragen werden

$$F_t = \mu_0 F_n = \mu_0 \cdot l \cdot d \cdot p.$$

Für das Verhältnis der Flächenpressung
gilt¹:

$$F_n = l \cdot d \cdot p = l_k \cdot b \cdot p_n;$$

$$p = \frac{l_k \cdot b}{l \cdot d} p_n.$$

l_k = Länge des Keiles in mm

b = Breite der Berührungsfläche am Keil in mm

l = Länge der Nabe in mm

p_n = Flächenpressung senkrecht zur Keilfläche an
der Nabe in MPa

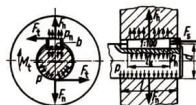


Bild 6.36. Beanspruchung einer Längskeilverbindung

¹ Die exakte Berechnung von p_n ist sehr umständlich.
Erfahrungsgemäß überschreitet p_n den Wert von
90 MPa nicht.



Schrumpfverbindung. Zur Kraftübertragung werden Haftkräfte genutzt, die durch elastisches Verspannen der Teile entstehen. Das elastische Verspannen erfolgt durch Zusammenfügen von Teilen mit Übermaß. Die Verringerung des Übermaßes ruft Kraftwirkungen in den elastischen Teilen hervor, die schließlich als Flächenpressung in der Verbindungsfuge wirken.

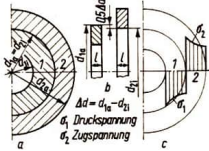


Bild 6.37. Durchmesser- und Spannungsverhältnisse bei einer Schrumpfverbindung: a im gefügten Zustand, b vor dem Fügen, c Spannungsverteilung

Durch Erwärmen des Teiles 2 und Unterkühlung des Teiles 1 läßt sich vorübergehend die Durchmesserdivergenz Δd beseitigen und Teil 1 ohne weiteren Kraftaufwand in Teil 2 fügen.

Nach Abkühlung bzw. Erwärmung auf Raumtemperatur im gefügten Zustand entsteht in den Teilen eine Schrumpf- bzw. Dehnspannung. Dabei gelten folgende Zusammenhänge:

$$\frac{\Delta d}{d_{1a}} = \alpha_1 \cdot \sigma_1 \cdot C_1 + \alpha_2 \cdot \sigma_2 \cdot C_2$$

$\alpha_{1,2}$ = Dehnzahlen der Teile 1,2
 $\sigma_{1,2}$ = Spannungen im Werkstoff der Teile 1,2
 $C_{1,2}$ = Beiwerte abhängig vom Durchmesser Verhältnis der Teile $\frac{d_i}{d_a}$

Zwischen der Flächenpressung p und der Spannung σ besteht dabei die Beziehung

$$p = \sigma \cdot \frac{1 - \frac{d_{21}}{d_{2a}}}{1 + \frac{d_{21}}{d_{2a}}}$$

Die übertragbare Längskraft F ergibt sich mit p zu

$$F = \pi \cdot d_{21} \cdot l \cdot \mu_0 \cdot p$$

$$\pi \cdot d_{21} \cdot l = \text{Haftfläche in mm}^2$$

$$\mu_0 = \text{Haftbeiwert}$$

$$p = \text{Flächenpressung in der Fuge in MPa}$$

Übertragbares Drehmoment:

$$M_t = 0,5 \cdot d_{21} \cdot F \quad \text{in Nm.}$$

p und σ sind vom Schrumpfmaß abhängig. Das Schrumpfmaß wird von der Schrumpftemperatur Δt_2 und der Ausdehnungstemperatur Δt_1 bestimmt sowie von den Wärme-dehnzahlen α_{t1} und α_{t2} . Bedingung für Fügevorgang: d_{21} erwärmt $>$ d_{1a} unterkühlt.

Daraus folgt

$$\Delta d < \Delta d_1 + \Delta d_2$$

$$\Delta d_1 = \alpha_{t1} \cdot d_{1a} \cdot \Delta t_1$$

$$\Delta d_2 = \alpha_{t2} \cdot d_{21} \cdot \Delta t_2$$

für $d_{21} - d_{1a}$ gegen 0 wird

$$\frac{\Delta d}{d_{1a}} < \underbrace{\alpha_{t1} \cdot \Delta t_1}_{\text{Unterkuhlung}} + \underbrace{\alpha_{t2} \cdot \Delta t_2}_{\text{Erwärmung}}$$

6.2.4. Bauelemente zur Fortleitung mechanischer Energie

Die Maschinen haben heute als Wirkungsenergie überwiegend noch die mechanische Energie. Diese ist vom Energieteil bis zum Arbeitsorgan zu leiten. Die Fortleitung der mechanischen Energie in Bauelementen erfolgt stets durch eine Kraftübertragung im Fortleitungsmedium. Die Kraftübertragungen lassen sich in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen durchführen. In festen Stoffen ist die Kraftübertragung durch Zug-, Druck-, Biege- und Verdrehbeanspruchungen, in flüssigen und gasförmigen Stoffen nur durch Druckbeanspruchungen möglich.

6.2.4.1. Fortleitung von Zugkräften

Zugkräfte können von starren und beweglichen festen Körpern, den Zugmitteln, als Längskräfte übertragen werden. Zu den



Zugmitteln gehören auf Zug beanspruchte Gestänge, Seile, Riemen, Ketten und bewegliche Laschen- oder Gliederverbindungen. Bemessung siehe Technische Mechanik, Seite 100.

6.2.4.2. Fortleitung von Druckkräften

Druckkräfte übertragen nur starre Körper, z. B. Schubgestänge, und flüssige bzw. gasförmige Stoffe in besonderen Gefäßsystemen, z. B. geschlossenen Rohrleitungen und Zylindern.

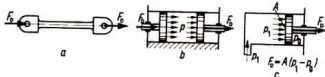


Bild 6.38. Fortleitung von Druckkräften: a Gestänge, b Druckkraftübertragung durch Kolbenpaar im feststehenden Zylinder, c Umsetzung eines Gas- oder Flüssigkeitsdruckes in Druckkraft mittels Kolbens und Zylinders

Der zur Fortleitung der Druckkraft F_D in kurzen Gestängen notwendige Werkstoffquerschnitt A ergibt sich als

$$A = \frac{F_D}{\sigma_{d \text{ zul}}}, \text{ wobei } \sigma_{d \text{ zul}} \text{ die zulässige Druckspannung ist.}$$

Bei langen Gestängen muß das Ausknicken berücksichtigt werden. Die zulässige Knicklast wird nach *Euler* oder *Tetmajer* berechnet, hierzu siehe Technische Mechanik, Seite 101 f. Als Sicherheitsfaktor wird $\nu = 1,75$ bis 3 gewählt.

Bei der Kraftübertragung in flüssigen oder gasförmigen Körpern wird die Druckkrafteinwirkung in Flüssigkeits- oder Gasdruck umgesetzt, der sich allseitig in dem entsprechenden Gefäßsystem fortpflanzt. Durch geeignete Wirkungspaare, z. B. Kolben und Zylinder, kann Flüssigkeits- oder Gasdruck in eine gerichtete Druckkraft umgeformt werden.

6.2.4.3. Fortleitung von Drehmomenten

Die Fortleitung von Drehmomenten ist mit Wellen und Rädern, aber auch mit auf Rädern umlaufenden Zugmitteln (z. B. Riemen, Seilen und Ketten) und, so es sich

um winkelbegrenzte Drehmomente handelt, mit Hebeln möglich, Bild 6.39.

Drehmomentenübertragung mittels Welle. Unter Einwirkung eines Drehmomentes wird in einem beliebigen Körper eine Verdrehbeanspruchung erzeugt, die im Werkstoff eine Torsionsspannung hervorruft. Die Torsionsspannung ist eine Tangentialspannung (siehe Abschnitt 3.2.1.2.) und wirkt in Richtung der Tangente an einem Kreisbogen um die Drehachse des Momentes. Bei einer Welle ist diese Drehachse gleich der Körperachse.

Berechnung

Hauptgleichung der Verdrehbeanspruchung runder Querschnitte:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_p}$$

τ_t = Torsionsspannung in MPa; M_t = Drehmoment in Nm; W_p = polares Widerstandsmoment in mm^3

Für die Vollwelle ist

$$W_p = \frac{\pi}{16} d^3 \approx 0,2 d^3$$

und für die Hohlwelle:

$$W_p = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a} \approx 0,2 \cdot \frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a}$$

Durchmesser der Vollwelle für Verdrehbeanspruchung:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 M_t}{\pi \cdot \tau_{t \text{ zul}}}} = 1,72 \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_{t \text{ zul}}}} \quad \text{in mm.}$$

Durchmesser der Hohlwelle bei Verdrehbeanspruchung:

$$d_a = 1,72 \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_{t \text{ zul}} \left(1 - \frac{d_i^4}{d_a^4}\right)}}$$

Da Wellen aber auch Träger von Maschinenteilen sind, müssen sie noch Biegebeanspruchungen standhalten:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad \text{in MPa.}$$

M_b = Biegemoment in Nm

W_b = Widerstandsmoment bei Biegung um eine Achse

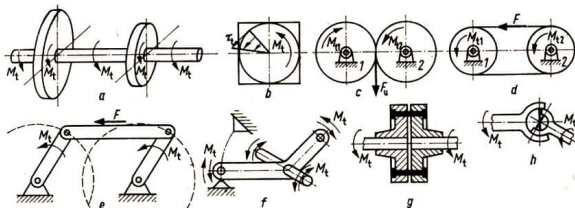


Bild 6.39. Drehmomentenübertragung: a mittels Welle, b im beliebigen Querschnitt, c mit Räderpaar, d mit auf Rädern umlaufendem Zugmittel, e mittels Kurbelschwinge, f winkelbegrenzt mittels Hebels, g feste Kupplung, h winkelbewegliches Gelenk

$$W_b = \frac{\pi}{32} d^3 \approx 0,1 d^3$$

in mm³.

Durchmesser der Vollwelle bei Biegebeanspruchung:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_b}{\pi \cdot \sigma_{b \text{ zul}}}} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_b}{\sigma_{b \text{ zul}}}}$$

Durchmesser der Hohlwelle bei Biegebeanspruchung:

$$d_a = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_b}{\sigma_{b \text{ zul}} \left(1 - \frac{d_i^4}{d_a^4}\right)}}$$

Bei *gleichzeitiger* Belastung von Wellen auf Verdrehung und Biegung überlagern sich die Torsions- und Biegespannungen. Aus diesem Grunde wird dann die Festigkeitsbetrachtung mit einer *Vergleichsspannung* σ_v durchgeführt.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3(\alpha_o \tau_t)^2} \leq \sigma_{b \text{ zul}},$$

dabei ist

$$\alpha_o = \frac{\sigma_{b \text{ zul}}}{1,73 \tau_{t \text{ zul}}}$$

Die Vergleichsspannung kann als Normalspannung aufgefaßt werden, die sich bei der Belastung der Welle mit einem Vergleichsmoment M_v ergibt. Das Vergleichsmoment ist dann

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 (\alpha_o M_t)^2} \quad \text{in Nm.}$$

Damit berechnen sich die Durchmesser für Vollwellen

$$d = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_v}{\sigma_{b \text{ zul}}}}$$

und für Hohlwellen

$$d_a = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M_v}{\sigma_{b \text{ zul}} \left(1 - \frac{d_i^4}{d_a^4}\right)}}$$

d_a = Außendurchmesser
 d_i = Innendurchmesser

Drehmomentenübertragung mittels Räderpaars. Bei Räderpaaren wirkt das Antriebsrad 1 mit der Umfangskraft F_u auf das Abtriebsrad 2 ein und überträgt diese Kraftwirkung mittels Kraftschlusses (Reibradgetriebe) oder mittels Formschlusses (Zahnradgetriebe). Das Drehmoment M_t ergibt sich aus der angreifenden Umfangskraft F_u und ihrer Entfernung r von der Drehachse zu $M_t = F_u \cdot r$.

Ist $r_2 < r_1$, dann wird auch $M_{t2} < M_{t1}$, da die das Drehmoment übertragende Kraft F_u gleichbleibt.

Betrachtet man die Drehmomentenübertragung als verlustlos, dann ist die Antriebsleistung P_1 gleich der Abtriebsleistung P_2 . Nach der bekannten Beziehung

$$P = M_t \cdot n \quad \text{in W}$$

wird also

$$M_{t1} \cdot n_1 = M_{t2} \cdot n_2,$$



und damit kann das Übertragungsverhältnis geschrieben werden

$$\frac{M_{11}}{M_{12}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

Wird das Drehmoment mit einem Zwischenrad vom Antriebsrad auf das Abtriebsrad übertragen, dann ändert das Zwischenrad lediglich die Richtung der übertragenen Umfangskraft, so daß An- und Abtriebsrad gleiche Drehrichtung haben.

Begrenzte Drehmomentenübertragung mittels Hebels. Begrenzte Drehmomentenübertragung wird häufig mittels Hebels vorgenommen. Die Kraftwirkung beansprucht den Hebel auf Biegung. Der erforderliche Hebelquerschnitt ergibt sich deshalb aus dem erforderlichen Widerstandsmoment

$$W_{\text{erf}} = \frac{M_b}{\sigma_{b \text{ zul}}} \quad \text{in mm}^3$$

Drehmomentenübertragung mittels Kupplungen und Gelenken. Während Kupplungen Drehmomente stoff-, form- und kraftschlüssig übertragen können, finden wir bei Gelenken nur den Formschluß. Gelenke dienen hauptsächlich zur winkelbeweglichen Übertragung kleiner Momente, während für große Drehmomente Kupplungen eingesetzt werden.

Kupplungen lassen sich nach ihrer Wirkungsweise unterteilen in

- starre Kupplungen,
- bewegliche Kupplungen,
- Schaltkupplungen und
- Sicherheitskupplungen.

Während die Schalt- und Sicherheitskupplungen als Antriebs- und Anpassungsorgane im mechanischen Energiefluß wirken (siehe Abschnitt 6.2.7.), dienen die starren und beweglichen Kupplungen allein als Antriebsorgane.

Starre Kupplungen, die das Drehmoment durch Kraftschluß übertragen, sind z. B. Schalenkupplungen und Hülsenkupplungen; durch Formschluß übertragen z. B. die Scheibenkupplungen und Muffenkupplungen das Drehmoment.

Bewegliche Kupplungen ermöglichen den

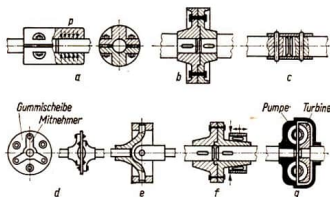


Bild 6.40. Kupplungsarten: a Schalenkupplung, b Scheibenkupplung, c Muffenkupplung, d Gummischeibenkupplung, e Kardangeln, f Rollenkupplung, g Strömungskupplung

Ausgleich von Längenänderungen in Wellen, von radialen Verlagerungen der Wellen und die Winkelbeweglichkeit von Wellen. Die Drehmomentenübertragung erfolgt stoffschlüssig, z. B. bei Gummischeibenkupplungen, formschlüssig, z. B. bei Zahnkupplungen, Kreuzscheibenkupplungen, Kardangeln, Kreuzgelenkkupplung und Klauenkupplung, und kraftschlüssig, z. B. bei Rollenkupplung, siehe Bild 6.40.

Durch den Einbau von energiespeichernden Elementen, z. B. Schrauben-, Dreh- und Blattfedern, sowie Gummipuffern, können Stöße in der Kraftübertragung gemildert oder gedämpft werden. Vermieden werden Stöße bei Strömungskupplungen. Dort erfolgt die Drehmomentenübertragung stoffschlüssig durch Massenkkräfte der Füllungsflüssigkeit (dynamische Flüssigkeitskupplung), die bei Beschleunigung im Pumprad (Antriebssteil) und bei Verzögerung im Turbinenrad (Abtriebssteil) wirksam werden. Diese Wirkungsweise vermeidet jede mechanische Berührung und damit Verschleiß, gestattet eine sanfte Kraftübertragung und verhindert dazu noch bei Überlastung das Abwürgen der die Antriebskraft liefernden Energiemaschine.

6.2.5. Bauteile zum Umformen mechanischer Energie

Jede Wirkung der mechanischen Energie ist durch ihre Größe und Richtung als Kraftwirkung längs eines bestimmten We-

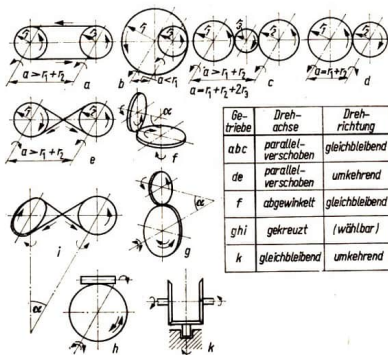


Bild 6.41. Möglichkeiten der Richtungsänderung und Lagenverschiebung von Drehbewegungen mit Radgetrieben:
a, e, i Zugmittelgetriebe; b, c, d Stirnradgetriebe; f, k Kegelradgetriebe; g Schraubenradgetriebe; h Schneckenradgetriebe

ges charakterisiert. Bei der Durchführung produktionstechnischer Vorgänge in Maschinen ist es oft erforderlich, daß am Arbeitsorgan eine bestimmte Größe der Kraft und ihre bestimmte Richtung längs eines vorgegebenen Weges eingehalten werden muß. Um das zu erreichen, muß die im Energieteil bereitgestellte mechanische Energie während ihrer Fortleitung zum Arbeitsorgan in die benötigte Größenordnung, Richtung und Bewegungsform umgeformt werden; das verrichten die Bauteile zum Umformen mechanischer Energie, die Getriebe. Nach ihrer konstruktiven Gestaltung lassen sich die Getriebe einteilen in

1. Radgetriebe
2. Kurbelgetriebe
3. Kurvengetriebe
4. Strömungsgetriebe

Radgetriebe dienen zur Umformung des Drehmomentes in Größe und Richtung sowie zur Lagen- und Richtungsänderung der Drehachsen.

Die Kraftübertragung erfolgt entweder formschlüssig, z. B. bei Zahn-, Schnecken- und Schraubenradgetrieben, oder kraftschlüssig, z. B. bei Reibradgetrieben.

Die Drehrichtungen- und die Lagenänderung bei Radgetrieben ist in Bild 6.41. dargestellt. Die Drehbewegung von Körpern wird durch die Umlaufgeschwindigkeit u ,

durch die Winkelgeschwindigkeit ω oder durch die Drehzahl n gekennzeichnet. Ihre Veränderungen bei der Bewegungsumformung in Radgetrieben gibt das Übersetzungsverhältnis i an:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{z_2}{z_1};$$

z = Zähnezahl bei Zahnradern

$$n = \omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2 \quad \text{in s}^{-1}.$$

Eine Sonderart der Radgetriebe sind die *Zugmittelgetriebe* (Bild 6.41. a, e, i). Bei diesen Getrieben erfolgt die Kraftübertragung durch Zugkräfte im Zugmittel und kraft- oder formschlüssig vom Antriebsrad auf das Zugmittel und vom Zugmittel auf das Abtriebsrad. Die Zugmittelgetriebe kommen dann zur Anwendung, wenn die Achsabstände größer als die Summe der Radien vom An- und Abtriebsrad sind. Nach der Art des Zugmittels unterscheidet man Riemen-, Seil- und Kettentrieb.

Der *Riementrieb* überträgt die Zugkraft kraftschlüssig zwischen Rad und Zugmittel infolge Haftreibung. Die Reibungszahl ist dabei abhängig von der Flächenpressung und Geschwindigkeit. Die Flächenpressung erzeugen Spannkraften, die bei großem Achsabstand und waagrechtlem Trieb durch



Eigengewicht entstehen, die durch Drehungsspannung beim normalen Trieb aufgebracht werden oder die mittels Spannrolle einstellbar sind. Nach der Gestaltung der Laufflächen unterscheidet man den Flachriementrieb und den Keilriementrieb. Beim Keilriementrieb übertragen die Wangenflächen des Keils die Kräfte. Dadurch erhöht sich auch die Flächenpressung gegenüber dem Flachriemen unter gleichgroßen Spannkraften. Während der Flachriementrieb einen Dehnschlupf von 1% bis 2% aufweist, fehlt er fast beim Keilriementrieb. Den Keilriementrieb zeichnet auch ein geringer Platzbedarf aus.

Der *Seiltrieb* nutzt ebenfalls die Haftreibung zur Kraftübertragung. Er wird heute kaum noch verwendet.

Der *Kettentrieb* überträgt die Zugkraft formschlüssig. Er gewährt eine schlupffreie Kraftübertragung. Nach den Ausführungsarten werden Rollenketten und Zahnketten unterschieden. Die Zahnketten haben gute Laufeigenschaften, sind jedoch schwerer als Rollenketten.

Der Vorteil des Riementriebes gegenüber dem Kettentrieb ist seine Elastizität. Er gestattet ein weiches Anlaufen bei gutem Durchzugsvermögen.

Der Flachriementrieb ermöglicht die Kraftübertragung auch bei sich kreuzenden Wellen (Bild 6.41.i).

Kurbelgetriebe sind periodisch arbeitende Getriebe. Sie formen eine gleichförmige Drehung des Antriebsgliedes in periodisch veränderliche Bewegung um und umgekehrt. Bei gleichförmiger drehender Antriebsbewegung erfolgt der Abtrieb als Hin- und Herbewegung auf gerader Bahn (Schubkurbel), Schwingungsbewegung um feste Achse (Kurbelschwinge, schwingende Kurbelschleife), Drehbewegung um feste Achse mit periodisch veränderlicher Winkelgeschwindigkeit (umlaufende Kreuzschleife) und beliebige Bewegung in gekrümmten Bahnführungen.

Die *Viergelenkkette* ist dabei Grundlage aller Getriebe. Nach Bild 6.42. sind a, b, c und d

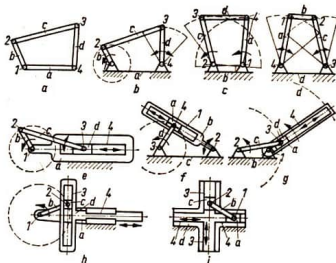


Bild 6.42. Aus der Viergelenkkette abgeleitete Kurbelgetriebe:

a Viergelenkkette, b Kurbelschwinge, c Doppelkurbel, d Doppelschwinge, e umlaufende Schubkurbel, f schwingende Kurbelschleife, g umlaufende Kurbelschleife, h Kreuzschleife, i Kreuzschleife (feststehende Kreuzschleife)

die vier Glieder, die durch Drehgelenke 1, 2, 3 und 4 beweglich verbunden sind. Gewöhnliche, aus der Viergelenkkette abgeleitete Getriebe sind die Kurbelschwinge, Doppelkurbel und Doppelschwinge. Wird aus dem Drehgelenk 4 der Viergelenkkette eine Geradföhrung, dann entsteht eine *Schubkurbelkette*. Daraus lassen sich als gewöhnliche Getriebe ableiten: die umlaufende Schubkurbel, umlaufende Kurbelschleife, schwingende Kurbelschleife und schwingende Schubkurbel. Wird zu der Föhrung 4 auch noch das Drehgelenk 3 zur Geradföhrung, dann entsteht eine *Kreuzschleifenkette*. Aus ihr lassen sich drei Getriebearten ableiten: umlaufende Kreuzschleifenkurbel, umlaufende Kreuzschleife und feststehende Kreuzschleife. Alle anderen mehrgliedrigen Getriebe sind Erweiterungen dieser viergliedrigen Grundgetriebe.

Die Bewegungsermittlung läßt sich rechnerisch nur bei einfachsten Getrieben durchführen, z. B. beim Schubkurbelgetriebe. Zur Untersuchung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnisse (z. B. bei Kurbelschwingen) werden zeichnerische Verfahren angewandt, wobei die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nach den



Gesetzen der Dynamik als Vektoren zu behandeln sind.

Kurvengetriebe werden verwendet, um eine gleichförmige Antriebsbewegung in hin- und hergehende oder schwingende Abtriebsbewegung mit vorgegebenem Bewegungsgesetz umzuformen. Die Bewegungsübertragung vom Antriebsglied auf das Abtriebsglied erfolgt kraftschlüssig oder formschlüssig. Liegen die Bewegungsrichtungen von Antriebsglied und Abtriebsglied in einer Ebene, dann wird das Getriebe als *ebenes* Kurvengetriebe bezeichnet, anderenfalls ist es ein *räumliches* Kurvengetriebe (Bild 6.43.).

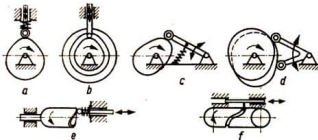


Bild 6.43. Kurvengetriebe: a, b, c, d ebene Kurvengetriebe; e, f räumliche Kurvengetriebe; a, c, e kraftschlüssige Bewegungsübertragung; b, d, f formschlüssige Bewegungsübertragung; a, b, c, e, f hin- und hergehende Antriebsbewegung; c, d schwingende Antriebsbewegung; a, b, c, d Kurvenscheibe als Kurventräger und e, f Kurvenzylinder als Kurventräger

Die Bewegungsgesetze des Abtriebsgliedes erfordern für eine bestimmte Drehwinkeländerung des Antriebsgliedes eine entsprechende Änderung des Radius der Kurvenscheibe (Bild 6.40.) bzw. Längenänderung der Mantellinie des Kurvenzylinders. Bedingung ist, daß die Übergänge zwischen Ruhe und Bewegung des Abtriebsgliedes stoßfrei verlaufen.

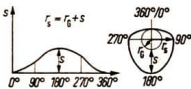


Bild 6.44. Bewegungsplan und Kurvenform

Strömungsgetriebe nutzen die Kraftwirkungen strömender Flüssigkeiten oder Gase zur Umformung mechanischer Energie (Bild

6.44.). Wird von einer Pumpe in einem Gefäßsystem ein Flüssigkeits- oder Gasdruck erzeugt, so kann dieser in einem Wirkungspaar Druckmedium — Kolben und Zylinder (Bild 6.38.c) in Schubkraft und Schubbewegung umgeformt werden. Durch entsprechende Regelbauteile läßt sich die Schubbewegung zu einer hin- und hergehenden Bewegung überführen. Die Antriebsbewegungen der Pumpen sind fast immer Drehbewegungen. So dienen diese *Kolbengetriebe für Geradwege* zur Umformung von Drehbewegungen in Hin- und Hergang (Bild 6.45.a). Die *Flüssigkeits-Wechselgetriebe* werden zur Umformung der Drehzahl und des Drehmomentes eingesetzt, ebenfalls auch der Strömungswandler (Bild 6.45.b und c).

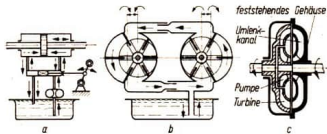


Bild 6.45. Strömungsgetriebe: a Getriebe für Geradwege, b Flüssigkeits-Wechselgetriebe, c Strömungswandler

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich ein und dieselbe Bewegungsumformung durch mehrere, in ihrem Aufbau vollkommen verschiedene Getriebe erreichen läßt. Den Einsatz einer bestimmten Getriebekonstruktion bedingt ihre Betriebssicherheit, geringe Herstellungs- und Betriebskosten sowie die ihr zugrunde liegenden Bewegungsgesetze.

6.2.6. Bauteile zum Speichern mechanischer Energie

Durch den Ablauf der produktionstechnischen Vorgänge bedingt, treten im Energiefluß der Maschinen oftmals Ungleichförmigkeiten auf. Dabei ist es notwendig, momentanen Energieüberschuß in Bauteilen aufnehmen oder einen Energiezuschuß aus



ihnen entnehmen zu können. Einen solchen Energieausgleich bieten z. B. Schwungmassen und Federn bei der Fortleitung mechanischer Energie in festen Körpern sowie Druckkessel in hydraulischen und pneumatischen Leitungssystemen. Ebenso können Massen als Energiespeicher dienen, wenn ihre Höhenlage verändert wird, z. B. im Uhrwerk der Gewichtsuhr.

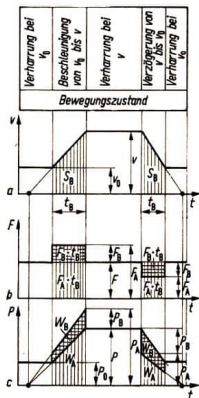


Bild 6.46. Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge einer Schwungmasse bei konstanter statischer Belastung

Schwungmassen als Energiespeicher. Bild 6.46. zeigt in Diagrammdarstellung das Betriebsverhalten einer Schwungmasse als Energiespeicher. Im v - t -Diagramm (Bild 6.46. a) ist die Beschleunigung von v_0 auf v während der Zeit t_B und dem dabei durchlaufenen Weg s_B sowie (im rechten Teil des Diagramms) die Verzögerung von v auf v_0 in der Zeit t_B und längs s_B dargestellt. Den Verlauf der Kraftwirkung gibt das F - t -Diagramm wieder (Bild 6.46. b). Die Beschleunigung von der Geschwindigkeit v_0 auf v wird durch den erhöhten Kraftaufwand F_B während der Dauer der Beschleunigung in t_B aufgebracht. Im gleichbleibenden Bewegungszustand mit der Verharrung bei der Ge-

schwindigkeit v bleibt die Kraftwirkung $F_B \cdot t_B$ in der Schwungmasse gespeichert. Erst bei der Verzögerung von v auf v_0 wird diese gespeicherte Energie frei. Um den Betrag $F_B \cdot t_B$ muß die Antriebswirkung $F_A \cdot t_B$ im Verzögerungsbereich kleiner sein, d. h., dieser Überschußbetrag kann an dieser Stelle des Bewegungsablaufes zur Verrichtung einer zusätzlichen Arbeit genutzt werden. Das Leistungsverhalten zeigt dazu das P - t -Diagramm (Bild 6.46. c). Die im Beschleunigungsvorgang zugeführte Arbeit W_B steht während der Verzögerung als abzuführende Arbeit in der Größe von W_B zur Verfügung. Die zur Beschleunigung aufzubringende Leistung wächst in der Zeit t_B auf P_B an, während die Antriebsleistung von P_0 auf P im Verharrungszustand bei v ansteigt. Im Bereich der Verzögerung ist die Leistungsabgabe durch das Absinken von P auf P_0 gekennzeichnet.

Im Bewegungsablauf nach Bild 6.46. beträgt die größte Beschleunigungsleistung $P_B = F_B \cdot v$. Während der Beschleunigungszeit wächst die erforderliche Leistung von $P_0 = F \cdot v_0$ auf $P = F \cdot v$, d. h., die Arbeit $W_A = F \cdot s_B = F \cdot \frac{(v + v_0)}{2} t_B$ ist zur Übertragung der Umfangskraft F aufzubringen. Daraus ergibt sich die größte Anlaufleistung $P_A = P + P_B = (F + F_B) v$ und die gesamte Anlaufarbeit $W_A = W + W_B$.

Federn als Energiespeicher. In Federn wird die Energie als Arbeitsvermögen des Werkstoffes bei dessen Beanspruchung im elastischen Bereich gespeichert. Nach der Belastungsart teilt man die Federn ein in Biegefedern und Verdrehungsfedern. Biegefedern sind z. B. Blattfedern und Spiralfedern. Zu den Verdrehungsfedern gehören die Zug- und Druckfedern.

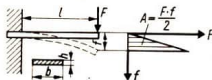


Bild 6.47. Skizze zur Berechnung einer Blattfeder



scheiden sich nach der Art der Kraftübertragung in formschlüssige, z. B. Zahn-, Klauen- und Bolzenkupplungen, kraftschlüssige, z. B. Reibkupplungen, und stoffschlüssige, z. B. schaltbare Strömungskupplungen.

Während die formschlüssigen Kupplungen nur bei Gleichlauf und Stillstand schaltbar sind, können die kraft- und stoffschlüssigen in jedem Betriebszustand des Energie- und Arbeitsteils der Maschine geschaltet werden. Formschlüssige Kupplungen würden beim Schalten unter Last das zu übertragende Drehmoment stoßartig weiterleiten und damit Energie- und Arbeitsteil einer Stoßbeanspruchung aussetzen, die der vollen aufzubringenden Beschleunigungsenergie entspricht. Diese Überbeanspruchung der Bauteile führt zu Schädigungen. Bei Reibkupplungen dagegen kann höchstens das Reibmoment übertragen werden. Sobald das Drehmoment diesen Wert überschreitet, rutscht die Kupplung. Der Rutschvorgang wird dann beendet, wenn der Abtrieb auf die Geschwindigkeit des Antriebs beschleunigt ist.

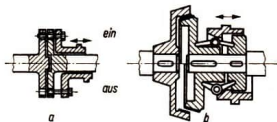


Bild 6.49. Schaltkupplungen: a Bolzenkupplung, b Reibkegelkupplung

Strömungskupplungen beschleunigen völlig stoßfrei.

Schaltbare Strömungskupplungen finden Anwendung als verschleißlose Anlaufkupplung bei durchlaufender Antriebsmaschine und zur sanften, schwingungsdämpfenden Kraftübertragung (siehe Abschnitt 6.2.4.3.). Bild 6.50. zeigt den Drehzahlverlauf beim Einschalten von form-, kraft- und stoffschlüssigen Schaltkupplungen. Die Drehzahl des Antriebsteils vor dem Schaltvorgang n_1 soll das Abtriebsteil als Arbeitsdrehzahl $n_2 = n_1$ haben. Im Zeitpunkt I

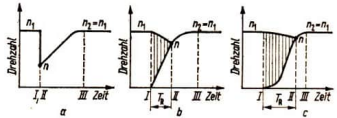


Bild 6.50. Drehzahlverhalten beim Schalten unter Last: a mit formschlüssiger Kupplung, b mit Reibkupplung, c mit schaltbarer Strömungskupplung

beginnt der Schaltvorgang und endet im Zeitpunkt II, wenn An- und Abtriebsteil die gemeinsame Drehzahl n haben. Die geforderte Arbeitsdrehzahl $n_2 = n_1$ wird im Zeitpunkt III erreicht.

Im Schaltvorgang bei formschlüssigen Kupplungen (Bild 6.50. a) erfolgt stoßartig die Mitnahme des Abtriebs. Dadurch ist ein großes Beschleunigungsmoment erforderlich. Das plötzliche Aufbringen dieses Beschleunigungsmoments ist die Ursache für den Drehzahlsprung von n_1 auf n . Das vom Antrieb abgegebene Moment entspricht dem Verharrungsmoment, das überwunden werden muß. Vom Zeitpunkt des Schaltens I, II bis zum Zeitpunkt III muß die Antriebsmaschine ein weiteres Beschleunigungsmoment bringen, um im Abtriebs wie auch im Antriebsteil die Drehzahl n_2 zu erreichen.

Die Reibkupplung zeigt dagegen einen stetigen Anstieg der Drehzahl, wobei als Beschleunigungsmoment das übertragene Reibmoment wirkt. Von Zeitpunkt I bis Zeitpunkt II wird jedoch das Verharrungsmoment auf der Abtriebsseite stetig überwunden. Die Reibungskupplung rutscht dabei unter Übertragung des Reibmomentes. Während der Rutschzeit T_R erfolgt die stetige Beschleunigung des Abtriebs, und der Schaltvorgang ist beendet, wenn die Drehzahl n erreicht ist. Die durch das Rutschen der Kupplung verursachte Bremswirkung auf den Antrieb verringert dessen Drehzahl von n_1 auf n . Erst nach Greifen der Kupplung beschleunigen sich An- und Abtrieb auf $n_2 = n_1$.

Bei schaltbaren Strömungskupplungen beginnt die Übertragung des Beschleunigungs-



moments während des Füllvorganges. Dabei wird die Antriebsbewegung kaum spürbar verzögert. Nach Beendigung des Füllvorganges steigt die Beschleunigung steiler an, wobei eine geringe Erniedrigung der Antriebsdrehzahl n_1 erfolgt. Die Rutschzeit T_R ist bei diesen Kupplungen durch die für das Einfüllen der Flüssigkeit benötigte Zeitdauer bestimmt. Zum Schalten einer winkelbegrenzten Drehbewegung durch einen umlaufenden Antriebsteil benutzt man *Schaltwerke*, z. B. das Malteserkreuz.

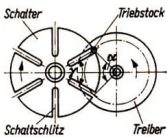


Bild 6.51.
Malteserkreuz

Das Malteserkreuz besteht aus einem umlaufenden Antrieb, dem Treiber, auf dem ein Triebstock angebracht ist, der in radiale Schaltschlitze des Abtriebs, den Schalter, eingreift und diesen bewegt, bis er aus dem Schaltschlitze wieder austritt. Dabei dreht sich der Treiber um den Treibwinkel α und der Schalter um den Schaltwinkel γ . Bis der Treiber den Rastwinkel $360^\circ - \alpha$ durchlaufen hat, steht der Schalter still. Bei konstanter Winkelgeschwindigkeit des Treibers ist die Winkelgeschwindigkeit des Schalters durch das Eindringen des Triebstockes in den Schaltschlitze sehr stark veränderlich.

Solche Schaltwerke kommen als Antriebe für Taktförderer (z. B. in Flaschenabfüllmaschinen) zum Einsatz. Ähnlich arbeiten auch Sternradgetriebe, deren Schaltwinkel größer als bei Malteserkreuzen sind.

Zum Schalten des mechanischen Energieflusses in Flüssigkeits- und Gasströmen dienen Schieber, Hähne, Ventile und Klappen (Bild 6.52.).

Zum *Regeln* des mechanischen Energieflusses können sowohl spezielle Regler als auch in bestimmten Grenzen die Schalter eingesetzt werden.

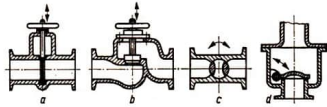


Bild 6.52. Rohrleitungsschalter: a Absperschieber, b Absperrenteil, c Absperrrahn, d Rückschlagklappe

Regler bei der Übertragung von Drehmomenten sind z. B. *Rutschkupplungen*, die ein bestimmtes Drehmoment übertragen. Das Drehmoment ist abhängig vom Reibmoment. Das Reibmoment kann durch einen Anpreßdruck über einstellbare Druckfedern erzeugt werden.



Bild 6.53. Fliehkraftkupplungen: a mit Segmenten, b mit Stahlkugeln und c mit Schleuderbacken als Fliehkgewichte

Zu diesen Reglern gehören auch die *Fliehkraftkupplungen*, die eine Drehmomentenübertragung erst von einer bestimmten Drehzahl der Antriebsmaschine an zulassen. Diese durch Fliehkraft geregelten Kupplungen verbessern das Drehzahlverhalten der Antriebsmotoren und deren Stromaufnahme, wie in Bild 6.54. dargestellt ist.

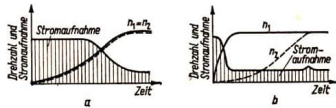


Bild 6.54. Kennlinien des Drehzahlverhaltens und der Stromaufnahme eines Kurzschlußläufermotors: a ohne und b mit Fliehkraft geregelter Kupplung (n_1 Motordrehzahl, n_2 Maschinendrehzahl)

Unter Nutzung der Fliehkraftwirkung in Bremsen kann die Drehmomentenübertragung derart geregelt werden, daß beim Überschreiten einer Grenzdrehzahl um-



laufende Bremsbacken gegen eine feststehende Bremstrommel drücken und dadurch das Antriebsmoment um das Bremsmoment verringern, z. B. beim *Bremsregler* (Bild 6.55. a).

Die gleiche regelnde Wirkung läßt sich auch durch andere *Reibbremsen*, z. B. Bandbremsen und Backenbremsen, für eine Bewegung oder Belastung von Maschinen erreichen (Bild 6.55. b und c), wobei die Bremslast F_B das aufzubringende Bremsmoment bestimmt.

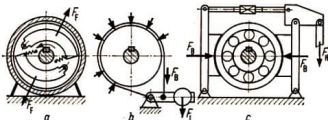


Bild 6.55. Reibbremsen: a Bremsregler, b Bandbremse und c Doppelbackenbremse

Fliehkraftregler zur Anpassung eines bestimmten Drehmomentes oder einer Drehzahl wirken über Drehzahlstellvorrichtungen auf stufenlos regelbare Getriebe oder auf die Energie der Antriebsmaschinen (Kraftstoffzufuhr bei Verbrennungsmotoren, Dampfzufuhr bei Dampfturbinen).

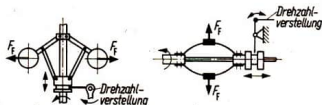


Bild 6.56. Fliehkraftregler als Drehzahlregler

Bauteile zum Begrenzen der Geschwindigkeiten geradliniger Bewegungen können Reibbremsen sein, aber auch Bewegungsdämpfer, z. B. hydraulische Stoßdämpfer. Diese hydraulischen *Stoßdämpfer* nutzen den Strömungswiderstand, der mit dem Quadrat der Bewegungsgeschwindigkeit wächst, um Geschwindigkeiten in bestimmten Grenzen zu halten und stoßartige Beschleunigungen abzufangen.

6.2.8. Bauteile als Widerstände im mechanischen Energiefluß

Als Widerstände für umlaufende und geradlinige Bewegungen werden *Gesperre* angewendet. Zum willkürlichen oder selbsttätigen Sperren einer Bewegung, vorwiegend aber zum Sperren der einen und Freigabe der anderen Bewegungsrichtung, dienen Reib- oder Klemmgesperre, Zahn- oder Klinkengesperre und Rasten.

Bei der Kraftübertragung in hydraulischen und pneumatischen Leitungssystemen werden Blenden und Drosseln als Widerstände verwendet.

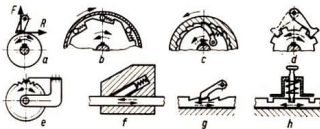


Bild 6.57. Mechanische Widerstände: a Reibgesperre, b Rollengesperre, c Zahngesperre, d Klinkengesperre, e Rastfeder, f Richtgesperre, g Zahnschubgesperre, h Verriegelung

6.2.9. Bauteile als Stoffträger und Träger für Arbeitsorgane

Während feste Stoffe durch mechanische Greifer, Halter, Einspannungen und Fassungen an der Wirkungsstelle eine bestimmte Lage erhalten, müssen flüssige und plastische Stoffe in Behältern, z. B. Trommeln, Bottichen, Wannen, Trögen und Kesseln, der Einwirkung des Arbeitsorgans ausgesetzt werden.

An den Werkzeugmaschinen finden wir die Stoffträger als *Spannzeuge*, z. B. Dreihakenfutter, Klemmbacken und Spanndorn an den Drehmaschinen, Maschinenschraubstöcke an den Bohr- und Fräsmaschinen, Spannbacken an den Sägemaschinen oder Spannvorrichtungen zur Bearbeitung von Werkstücken in automatischen Maschinenfließreihen.

An Textilmaschinen sind es Spindeln, Nadeln, Litzen, Fadenführer oder Schütze, an



den Druck- und Falzmaschinen die Anlegeapparate mit Saugern usw.

Die Stoffträger wie auch die Träger für Arbeitsorgane müssen immer der Gestalt und der Festigkeit der zu tragenden Teile gerecht werden, aber in Sonderfällen ebenso den auszuführenden Bewegungen. Deshalb sind diese Trägerorgane oft recht komplizierte, spezielle Konstruktionen, die nicht auf andere Maschinentypen übertragen werden können.

6.2.10. Baugruppen

Die in verschiedenartigen Maschinen vorkommenden Bauteile von Maschinen einschließlich ihrer Trägerelemente gestatten es, sie zu Baugruppen konstruktiv zusammenzufassen, z. B. die Getriebe, Elektromotoren, Maschinengestelle, Werkstück- und Werkzeugträger sowie Regler und Meßmittel. Eine Baugruppe kann somit mehrere Organe einer Maschine mit verschiedenen Funktionen enthalten. Die Wiederholbarkeit von gleichen Baugruppen in verschiedenen Maschinen wurde nun Ausgangspunkt, Maschinen aus den Baugruppen nach einem Baueinheitensystem zu montieren.

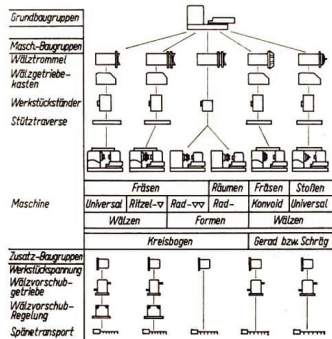


Bild 6.58. Baueinheitenprinzip bei Kegelrad-Verzahnmaschinen

Durch Kombination einheitlicher Baugruppen können so Maschinen für verschiedene Fertigungszwecke und Leistungen aufgebaut werden. Bild 6.58. demonstriert das Baueinheitenprinzip bei Verzahnungsmaschinen. Aus Grundbaugruppen entstehen durch Verwendung entsprechender Maschinenbaugruppen verschiedene Kegelradverzahnungsmaschinen. So wird durch Einbau der Wälztrommel, des Wälzgetriebekastens, des Werkstückständers und der Stütztraverse die universale Zahnrad-Wälzfräsmaschine für Kegelräder mit Kreisbogenverzahnung aufgebaut. Durch Anbau anderer Maschinenbaugruppen entstehen aus derselben Grundmaschine die Zahnrad-Wälzfräsmaschine für Kegelräder mit Konvoid-Verzahnung oder die Zahnrad-Vorfräsmaschine für kurvenverzahnte Telleräder.

Nach diesem Baueinheitenprinzip lassen sich nicht nur Werkzeugmaschinen und automatische Maschinenfließreihen der Metallbearbeitung herstellen, sondern alle in Serie gebauten ähnlichen Maschinentypen. Das Baueinheitenprinzip ist eine wirtschaftliche Methode, die den Anforderungen der automatischen Produktion in der Herstellung wie im Einsatz der Maschinen gerecht wird.

6.3. Maschinen im Produktionsprozeß

6.3.1. Einteilung der Maschinen nach ihrem Einsatz in den technologischen Prozessen

Die nach ihren technologischen Aufgaben im Abschnitt 6.1.2. eingeteilten Maschinen lassen sich nach den ihnen zugrunde liegenden Wirkungsprinzipien weiter unterteilen, beispielsweise die Maschinen zur Durchführung der Energieumwandlungsprozesse in Maschinen zum

- Umwandeln thermischer in mechanische Energie,
- Umformen mechanischer Energie,
- Umwandeln chemischer in mechanische Energie,



- Umwandeln elektrischer in mechanische Energie,
- oder die
- Maschinen zur Durchführung der Stoffformungsprozesse in Maschinen zum
- Stoffzubereiten,
- Urformen,
- Umformen,
- Trennen,
- Fügen,
- Beschichten,
- Stoffeigenschaftändern.

In gleicher Weise können die Maschinen aller technologischen Prozesse geordnet werden.

6.3.2. Maschinen zur Durchführung der Energieumwandlungsprozesse

6.3.2.1. Maschinen zur Umformung mechanischer Energie

Die mechanische Energie wird in Maschinen in der Erscheinungsform der kinetischen Energie, Bewegungsenergie, als Drehmoment an einer Welle oder als Schubkraft längs eines bestimmten Weges genutzt. In natürlichen oder technischen Energiespeichern tritt die mechanische Energie in der Erscheinungsform der potentiellen Energie, Energie der Lage, auf. Solche Energiespeicher sind Flüssigkeits- oder Gasbehälter, in denen das Trägermedium der Energie unter einem Wirkungsdruck gespeichert ist, z. B. in Flüssigkeits- oder Gasbehältern von Hydraulik- oder Pneumatikanlagen. Feste und flüssige Stoffe wirken ebenso als Energiespeicher, wenn sie mit einem überwindbaren Höhenunterschied gelagert werden, z. B. Wassermasse in Stauwerken von Wasserkraftanlagen, Masse eines angehobenen Fallhammers.

Die gespeicherte mechanische Energie läßt sich immer in eine Kraftwirkung längs eines Weges umformen und beträgt

$$W = \Delta p \cdot V = F_D \cdot s$$

und

$$W = m \cdot g \cdot h = F_G \cdot s.$$

W	mechanische Energie	in J
Δp	Wirkdruck	in Pa
V	Volumen	in m ³
m	Masse	in kg
g	Fallbeschleunigung	in m · s ⁻²
h	Höhenunterschied	in m
F_D, G	Kraftwirkung	in N
s	Weg	in m

Werden diese Energiespeicher mit Einrichtungen zur Fortleitung der mechanischen Energie verbunden, dann erfolgt darin die Kraftübertragung als Druckkraftwirkung im Wirkungsquerschnitt (Bild 6.59.).

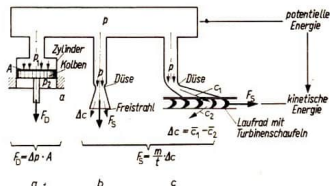


Bild 6.59. Umformen potentieller Energie in kinetische Energie mittels der Wirkungs-paare

- a Druckmedium – Zylinder und Kolben
- b Druckmedium – Düse und Freistrah
- c Druckmedium – Düse und Turbinenschaufel

Die Maschinen zur Umformung mechanischer Energie haben die Aufgabe, die potentielle in kinetische Energie umzuformen und fortzuleiten.

Wirkungsprinzip. Für die Umsetzung des Druckes p in die Kraftwirkung F_D längs eines Weges s bei der mechanischen Energieumformung sind zwei Methoden zur Anwendung des Wirkungsprinzips für die Fortleitung der mechanischen Energie bekannt:

- statisch wirkend – die Kolbenverschiebung;
- dynamisch wirkend – der Impulsaustausch.

Kolbenverschiebung. Jedes unter hohem Druck p_1 stehende Medium hat das Bestreben, sich in Richtung eines niedrigeren Druckes p_2 bei gleichzeitiger Vergrößerung seines Volumens zu verschieben. Dabei tritt in der Schubrichtung die Kraftwirkung F_D auf, die sich ergibt als das Produkt der



Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ in Pa und der Schubquerschnittsfläche A in m^2 zu

$$F_D = \Delta p \cdot A \quad \text{in N.}$$

Bei der Kolbenverschiebung wirkt die Kraft F_D längs des Schubweges s und verrichtet dabei die Verschiebearbeit W_A :

$$W_A = F_D \cdot s = \Delta p \cdot A \cdot s = \Delta p \cdot V \quad \text{in J.}$$

Die Druckdifferenz Δp und das Volumen des Mediums V kennzeichnen den Vorgang der Energieumformung. Die umgeformte Energiemenge entspricht der Verschiebearbeit, wenn der Vorgang als verlustlos betrachtet wird. Die Verschiebearbeit läßt sich anschaulich im p - V -Diagramm darstellen (Bild 6.60.).

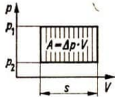


Bild 6.60.
Verschiebearbeit bei gleichbleibendem Druck p_1 und p_2

Die technische Anwendung dieses Vorgangs der Energieumformung ist durch die Wirkungsweise der Verschiebung zwischen Zylinder-Kolben möglich (Bild 6.59.). Bei dieser Wirkungsweise können sowohl der Zylinder als auch der Kolben oder sogar beide gleichzeitig beweglich sein (Bild 6.61.).

Impulsaustausch. Jede Geschwindigkeitsänderung Δc einer in der Zeiteinheit t bewegten Masse m verursacht eine Kraftwirkung F_s (Bild 6.59.b und c):

$$F_s = \frac{m}{t} \cdot \Delta c \quad \text{in N.}$$

Strömt das Trägermedium als Freistrahlaus, z. B. aus einer Düse, so erzeugt die in der Zeiteinheit mit einer Geschwindigkeit ausströmende Masse eine Reaktionskraft als Schubkraft des Freistrahls (Bild 6.59.b).

$$F_s = \frac{m}{t} \cdot c$$

F_s Reaktionskraft (Schubkraft) in N
 t Zeit in s
 c Geschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Ist der durchströmte Kanal gekrümmt, dann verursacht die Richtungsänderung der Strömung von der Eintrittsgeschwindigkeit auf die Austrittsgeschwindigkeit eine Reaktionskraft

$$F_s = \frac{m}{t} \cdot c_1 - \frac{m}{t} \cdot c_2 = \frac{m}{t} \cdot \Delta c$$

c_1 Eintrittsgeschwindigkeit
 c_2 Austrittsgeschwindigkeit
 Δc Geschwindigkeitsdifferenz

Solche Kanäle zur Strömungsumlenkung sind beispielsweise die Räume zwischen Turbinenschaufeln (Bild 6.59.c).

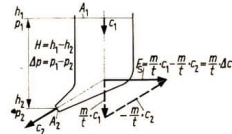


Bild 6.62: Kraftwirkung F_s eines strömenden Mediums in einem gekrümmten Kanal mit der Eintrittsgeschwindigkeit c_1 und der Austrittsgeschwindigkeit c_2

Durch die Ausnutzung der unter Druckeinwirkung entstehenden Schubbewegung läßt sich Druck in Geschwindigkeit umsetzen. Das erfolgt technisch in einer Düse. Die Düse ist dabei ein Kanal, dessen Querschnitt allmählich abnimmt. Da die durch eine Düse strömende Menge des Mediums (Durchsatz Q in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) in jedem Querschnitt gleich bleibt, vergrößert sich ihre Strömungsgeschwindigkeit:

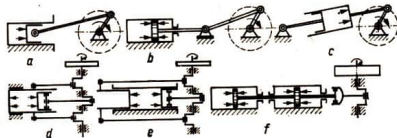


Bild 6.61.

Anordnungen von Zylinder und Kolben: a einfachwirkender Kolben, b doppelwirkender Kolben, c beweglich angeordneter Zylinder, d beweglich angeordneter Zylinder und Kolben, e Doppelkolbenanordnung, f Tandemanordnung doppelwirkender Kolben



$$Q = c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 = \text{konst.}$$

Für $A_1 > A_2$ ist demnach $c_1 < c_2$.

Q = Mengendurchsatz in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

c = Strömungsgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

A = Querschnittsfläche in m^2

Die Ausströmgeschwindigkeit c_2 wird dabei von der umzusetzenden Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ erzeugt.

$$c_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}, \text{ wobei } \rho \text{ die Dichte des Mediums ist.}$$

Für Wasser wird die Ausflußgeschwindigkeit

$c_2 = \sqrt{2gH}$, wenn es aus einem Kanal (Bild 6.62.) mit einem Höhenunterschied der Wasserspiegel von $H = h_1 - h_2$ strömt. Fließt dem Kanal noch Wasser mit der Geschwindigkeit c_1 zu, dann erhöht sich die Ausströmgeschwindigkeit auf

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H + c_1^2}$$

oder bei gleichem Durchsatz mit

$$c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2$$

auf

$$c_2 = \sqrt{\frac{2gH}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \text{in } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Diese durch den Impulsaustausch hervorgerufenen Kraftwirkungen werden technisch genutzt in den Wirkungspaaren Druckmedium und Düse-Freistrah, Druckmedium und Düse-Turbinenschaufel.

Während in der Wirkungsweise des Wirkungspaares Druckmedium und Düse-Freistrah die gesamte zur Verfügung stehende kinetische Energie (nach der Düse) in Schubarbeit umgeformt wird, gestattet die Wirkungsweise des Wirkungspaares Druckmedium und Düse-Turbinenschaufel eine stufenweise Energieumformung (Bild 6.63.). Dabei wird in jeder Stufe der Turbine (bestehend aus Leitrad und Lauf- rad) ein bestimmter Anteil des Gesamtdruckes umgesetzt. Erfolgt die Druckumsetzung nur im Leitschaufelkanal, während im Lauf- schaufelkanal der Druck konstant bleibt,

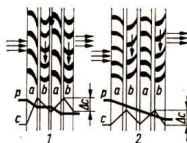


Bild 6.63.

Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Gleichdruckturbinen- (1) und Überdruckturbinen- (2): a Leitschaufel (Düse), b Lauf- schaufel

dann ist die Turbine eine Gleichdruckturbinen. Bei Überdruckturbinen findet sie sowohl in dem Leitschaufel- als auch in dem Lauf- schaufelkanal statt. Der Geschwindigkeitsabfall in dem Lauf- rad kennzeichnet den Impulsaustausch.

Bei der Umformung mechanischer Energie treten unvermeidliche Verluste auf. Das Verhältnis der zugeführten Energie zur umgeformten gibt der *mechanische Wirkungsgrad* an.

Turbinenart	maximaler Wirkungsgrad in %
Pelton	91,7
Francis	93,5
Kaplan	95,0

Übersicht 6.64.: Wirkungsgrade von Wasserturbinen

Die von einer Maschine in der Zeiteinheit verrichtete Arbeit wird als Leistung bezeichnet. Die Leistung ermöglicht einen größenordnungsmäßigen Vergleich von verschiedenen Maschinen.

Anwendung. Das Wirkungsprinzip zur mechanischen Energiefortleitung findet mittels der Wirkungspare Druckmedium und Zylinder-Kolben und Druckmedium und Düse-Turbinenschaufel Anwendung in Wasser- und Windkraftmaschinen sowie in Druckluftmaschinen.

In Verbindung mit den Wirkungsprinzipien zur Umwandlung chemischer und thermischer in mechanische Energie erscheint das Wirkungsprinzip der mechanischen Energiefortleitung in Verbrennungs-, Dampf- und Heißluftmotoren und -turbinen sowie auch in Strahltriebwerken und Raketen.

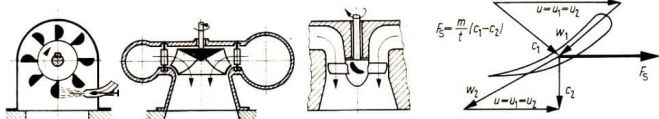


Bild 6.65. Wasserturbinenarten: Pelton-, Francis- und Kaplan-Turbine (von links nach rechts)

Wasserkraftmaschinen. Die heute am häufigsten betriebenen Wasserkraftmaschinen sind die Wasserturbinen. Nach ihren Wirkungsweisen und dadurch bedingten Konstruktionen unterscheiden sich die Turbinenarten in Pelton-, Francis- und Kaplan-Turbine. (Bild 6.65.)

In der Pelton-Turbine wird ein aus der Düse kommender Freistrahlf gegen die Umlenk-schaufeln des Turbinenrades gerichtet. Die Strahlumlenkung verursacht die Kraftwirkung, die vom Turbinenrad als Drehmoment mittels einer Welle fortgeleitet werden kann. Diese Turbinenart kommt bei großem Gefälle (410 m bis 1750 m) zum Einsatz (Hochgebirgskraftwerk).

Die Francis-Turbine ist eine Überdruck-turbine. Ein feststehender Schaufelkranz (Leitrad) leitet das in die Spirale einströmende Wasser dem Laufrad zu. Das Laufrad lenkt die Strömung aus der radialen Eintritts- in die axiale Austrittsrichtung um. Die Druckumsetzung erfolgt dabei zum Teil im Leitrad und im Laufrad. Francis-Turbinen sind einsetzbar für einen Fallhöhenbereich von 1,5 m bis 450 m. Sie sind am häufigsten in unseren Wasserkraftwerken zu finden.

Als Überdruckturbine arbeitet auch die Kaplan-Turbine, die Niederdruckwasserkräfte bis 20 m Fallhöhe ausnützt. Die Lauf-schaufeln sind meist drehbar und dadurch der Wasserführung gut anpaßbar. Sie werden deshalb vorteilhaft in Flußkraftwerken eingesetzt.

Wasserturbinen werden heute mit Leistungen bis 650 MW je Baueinheit ausgeführt.

Die Leistung einer Wasserkraftmaschine beträgt

$$P = Q \cdot \varrho_w \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad \text{in kW.}$$

Q Wasserdurchsatz in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ϱ_w Dichte des Wassers in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

H nutzbares Gefälle in m

g Erdbeschleunigung des Ortes in $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

η_T Turbinenwirkungsgrad (Übersicht 6.64.)

Windkraftmaschinen. Die Windkraftmaschinen nutzen den Impulsaustausch einer Windströmung an einem Flügelrad. Der Flügel lenkt dabei die Strömung um. Die entstehende Reaktionskraft wird vom Flügelrad auf die Abtriebswelle als Drehmoment übertragen. Die Flügel der Windkraftmaschinen können auch als Propeller (zwei- oder dreiblättrig) gestaltet sein.

Windkraftmaschinen werden verbreitet in dünnbesiedelten Gebieten ohne ausgebautes elektrisches Netz zur Einzelerzeugung mechanischer oder elektrischer Energie betrieben. Während Kleinanlagen bis 10 kW aufweisen, liegen die Leistungen mittlerer Anlagen von 10 kW bis 200 kW und Projekte von Großanlagen im MW-Bereich.

Druckluftmaschinen. In Druckluftmaschinen wird neben dem Wirkungspaar Druckmedium und Düse-Turbinenschaufel (Druckluftturbine) auch das Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder-Kolben (Druckluftkolbenkraftmaschine) verwendet. Solche Maschinen kommen hauptsächlich dort zum Einsatz, wo eine Explosions- oder Feuergefahr vermieden werden muß oder wo Druckluft als Gebrauchsenergie vorhanden ist.

Druckluftmaschinen werden in der Regel als Energieteil in bestimmten Verarbeitungs- und Transportmaschinen im Bergbau verwendet.

In Verbindung mit den Wirkungsprinzipien zur Umwandlung chemischer und thermischer in mechanische Energie erscheint das



Wirkungsprinzip der mechanischen Energiefortleitung in Verbrennungs-, Dampf-, und Heißluftmotoren und -turbinen sowie auch in Strahltriebwerken und Raketen.

6.3.2.2. Maschinen zur Umwandlung thermischer in mechanische Energie

Zwischen der thermischen und der mechanischen Energie bestehen größenmäßige physikalische Zusammenhänge, die als Energieäquivalente bezeichnet werden (Übersicht 6.66.).

Die thermische Energie läßt sich jedoch nur zum Teil in eine mechanische Energieform umwandeln.

	N · m	kW · h	kJ
N · m	1	$2,778 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$
kW · h	$3,6 \cdot 10^6$	1	$3,6 \cdot 10^3$
kJ	$1 \cdot 10^3$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	1

Übersicht 6.66.: Energieäquivalente

Jahr	Leistungsgrenze in kW	thermischer Wirkungsgrad in %
1775	7,5	1,5
1800	40	2,3
1840	45	4,6
1860	300	7,5
1880	400	9,0
1900	3 000	11,5
1930	12 000	28,7
1950	50 000	30,7
1960	150 000	43,0
1965	325 000	45,0
1975	etwa 1 000 000 ¹	etwa 50,0 ¹

¹ Versuchsanlagen

Übersicht 6.67.: Entwicklung des Wirkungsgrades von Dampfkraftanlagen

Das Verhältnis von umgewandelter zu zugeführter Energiemenge bezeichnet man als *Wirkungsgrad*. Der Wirkungsgrad stellt also einen Qualitätsbegriff dar. Je größer sein Zahlenwert ist, um so günstiger liegt die energetische Ausnutzung des Vorganges. Er kann theoretisch bei vollkommener Ausnutzung 100% beziehungsweise 1,0 erreichen, liegt aber in praktischen Vorgängen infolge unvermeidbarer Energieverluste stets niedriger.

$$\text{Der thermische Wirkungsgrad} = \frac{\text{mechanische Energie}}{\text{thermische Energie}}$$

beträgt in modernen Energieumwandlungsprozessen nur annähernd 50 Prozent. Die restliche Energiemenge bleibt als Wärme erhalten. Sie kann beispielsweise als Abdampf von Dampfkraftanlagen für Heizzwecke benutzt werden (Heizkraftwerke) (Übersicht 6.67.).

Wirkungsprinzip. Zur Umwandlung thermischer Energie in mechanische dient als Wirkungsprinzip die *Expansion* gasförmiger Stoffe.

Das Bestreben des Gases, sich in einem Raum niedrigeren Druckes auszudehnen, bezeichnet man als Expansion. Die bei der Expansion verrichtete Schiebearbeit charakterisiert die Größenordnung der in mechanische Energie umgewandelten thermischen Energie.

Eine Expansion des Gases findet statt, wenn sich seine Temperatur erhöht (Gesetz von Gay-Lussac), weil dann nach

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2$$

V = Gasvolumen in m³

T = Temperatur in °Kelvin

bei gleichbleibendem Druck sich das Volumen vergrößert oder bei gleichbleibendem Volumen der Druck erhöht

$$p_1 : p_2 = T_1 : T_2.$$

Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus Druck und Volumen konstant (Gesetz von Boyle-Mariotte).

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = \text{konst.}$$

Die Zustandsänderungen eines Gases lassen sich grafisch im p - V -Diagramm darstellen (Bild 6.68.).

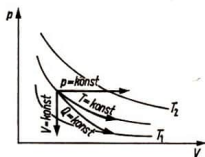


Bild 6.68.
Zustandsänderungen eines Gases im p - V -Diagramm



Wie Bild 6.68. erkennen läßt, erfolgt die Zustandänderung eines Gases bei konstantem Volumen unter Wärmezufuhr durch eine Druckerhöhung, bei konstantem Druck durch Volumenvergrößerung, bei konstanter Temperatur durch gleichzeitige Änderung von Druck und Volumen, und unter gleichbleibendem Wärmeinhalt vergrößert sich das Volumen unter Absenken des Druckes und der Temperatur.

Mit diesen Zustandänderungen kann die Umwandlung der thermischen in mechanische Energie beschrieben werden. Für die Expansion eines Gases im Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder—Kolben ergibt sich dabei folgendes Bild (Bild 6.69.):

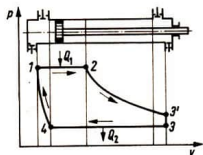


Bild 6.69.
Idealer Kreis-
prozeß einer
Dampfmaschine
im p - V -Dia-
gramm

Während der Zufuhr des Gases bei geöffnetem Einlaßventil mit der Wärmeenergie Q_1 wird der Kolben von seiner Ausgangsstellung 1 nach 2 verschoben. Schließt bei 2 das Einlaßventil, dann bewirkt die Wärmeenergie die weitere Verschiebung des Kolbens unter Absenkung des Druckes und der Temperatur, bis das Auslaßventil bei 3' geöffnet wird. Das Gas kann unter weiterer Druckabsenkung von 3' auf 3 entweichen. Die Rückführung des Kolbens erfolgt unter Ausstoßen des mit der Wärmeenergie Q_2 behafteten, im Zylinder verbliebenen Gases. Erst nach Schließen des Auslaßventiles bei 4 beginnt eine Druckerhöhung und Volumenverminderung durch die vom Kolben auf das Restgas aufgebraachte Verschiebearbeit. In der Kolbenstellung 1 beginnt der Vorgang wieder von vorn mit Wärmezufuhr des Frischgases. Diese Folge der Zustandänderungen wird als *Kreisprozeß* bezeichnet. Die von den Kurvenzügen eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die verrichtete mechani-

sche Arbeit. Der Kurvenverlauf kann als *Indikatordiagramm* von Kolbenmaschinen abgenommen werden.

Siehe auch Technische Wärmelehre, Seite 114 ff.

Anwendung. Die durch die Expansion hervorgebrachte Verschiebearbeit kann sowohl in dem Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder—Kolben als auch in den Wirkungs-paaren Druckmedium und Düse—Turbinschaufel und Druckmedium und Düse—Freistrahle nach den unter Abschnitt 6.3.1.1. beschriebenen Wirkungsweisen genutzt werden. Diese Maschinenarten sind die *Wärme kraftmaschinen*. Dazu gehören zum Beispiel die Dampfmaschinen und -turbinen, Heißluftmotoren und -turbinen sowie Abgas-turbinen.

Während bei den Kolbenmaschinen das Gas im Raum zwischen Zylinder- und Kolbenboden expandiert, erfolgt das bei den Turbinen in den Düsen beziehungsweise Leit-rädern oder in Leit- und Laufrädern (Bild 6.63.). Der Wärmeinhalt i des Gases wird so in Gasgeschwindigkeit umgesetzt, die nach dem Wirkungsprinzip des Impuls-austausches die nutzbare Kraftwirkung

$$F = \frac{m}{t} \Delta c \text{ an den Turbinenschaufeln ver-}$$

ursacht.

Die *Wärme kraftmaschinen* erhalten die Wärmeenergie durch das Arbeitsmedium (Dampf, Heißluft oder Abgas) zugeführt. In Dampferzeugern, Wärmetauschern oder Brennkammern erfolgt außerhalb der *Wärme kraftmaschinen* die Anreicherung der Wärmeenergie in den Arbeitsmedien. Die Energiequellen sind feste, flüssige oder gas-förmige Brennstoffe, deren chemische Ener-gie in Wärme umgewandelt wird, oder Atomkraft, die heute schon in geringem prozentualen Anteil zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird.

6.3.2.3. Maschinen zur Umwandlung chemischer in mechanische Energie

In Maschinen zur Umwandlung chemischer in mechanische Energie erfolgt im Gegen-satz zu den *Wärme kraftmaschinen* auch die

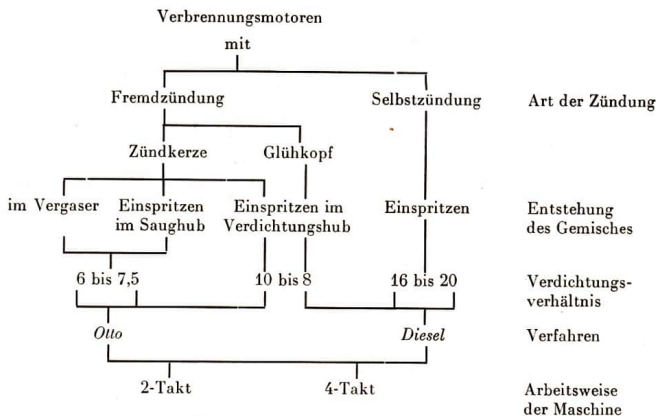


Umwandlung der chemischen Energie der Brennstoffe in Wärmeenergie innerhalb der Maschine. Deshalb werden diese Maschinen als Verbrennungskraftmaschinen bezeichnet. Die Energieumwandlungsvorgänge werden durch die bereits bekannten Wirkungsprinzipien der Umwandlung thermischer in mechanische Energie, der Expansion und der mechanischen Energiefortleitung, der Kolbenverschiebung und des Impulsaustausches gekennzeichnet. Jedoch geht diesen in ihrem Ablauf das Wirkungsprinzip zur Umwandlung chemischer in thermische Energie voraus.

Wirkungsprinzip. Das Wirkungsprinzip der Umwandlung chemischer in thermische Energie ist die *Verbrennung*. Die in den brennbaren Bestandteilen (C, H, CO und Kohlenwasserstoffverbindungen) der Brennstoffe enthaltene chemische Energie wird durch Oxydation als Wärmeenergie frei. Als Oxidationsmittel dient Sauerstoff. Zur Durchführung der Verbrennung werden die Brennstoffe und der Sauerstoff (vorwiegend Luftsauerstoff) als Gemisch in einen Ver-

brennungsraum gebracht. Der Verbrennungsraum ist bei Kolbenmaschinen der durch den Kolben abgeschlossene Zylinder, bei Strömungsmaschinen stets eine Brennkammer. Vom Mischungsverhältnis und von der Güte der Durchmischung hängt der Wirkungsgrad der Energieumwandlung ab. (Übersicht 6.70.).

Je nach der Art des Brennstoffes kann die Gemischbildung in einem Vergaser (Leichtöle) oder durch Einspritzen (Schweröle) in dem Verbrennungsraum vorgenommen werden. Bei Vergasermaschinen wird durch den Saughub des Kolbens das brennbare Gemisch aus dem Vergaser in den Verbrennungsraum gefördert. Um eine möglichst große Kraftwirkung zu erreichen, wird das Gemisch vor der Verbrennung noch verdichtet. Es kann aber auch der Brennstoff in bereits hochverdichtete Luft eingespritzt werden. Die Verbrennung wird durch Entzündung des Gemisches eingeleitet. Die Zündung kann als Fremdzündung, z. B. mit elektrischen Funken einer Zündkerze oder durch Glühkopf, und durch Selbstzündung



Übersicht 6.70.: Unterscheidungsmerkmale der Verbrennungsmotoren



erfolgen. Die bei der Verbrennung entstehenden Verbrennungsgase sind das Arbeitsmedium der Verbrennungskraftmaschinen. Die in Wärme umgewandelte chemische Energie erhöht den Wärmeinhalt der Verbrennungsgase, der durch Expansion und Impulsaustausch oder Kolbenverschiebung in nutzbare mechanische Energie umgewandelt wird.

Anwendung. Die Wirkungspaare der Verbrennungskraftmaschinen entsprechen denen der Wärmekraftmaschinen. Lediglich durch die Organe zur Brennstoffzuführung und Zündung unterscheiden sich diese Maschinenarten im prinzipiellen Aufbau. Nach den Wirkungsweisen in den Wirkungspaares unterteilt man die Verbrennungskraftmaschinen in Verbrennungsmotoren (Druckmedium und Zylinder-Kolben), Verbrennungsturbinen (Druckmedium und Düse-Turbinenschaufel) und Strahltriebwerke (Druckmedium und Düse-Freistrah).

Zug-, Druck- oder Schubkrafteinwirkung erfolgen. Während die Methode der Zerstörung einer Stoffform unter Zugkrafteinwirkung selten in Zerkleinerungsverfahren zur Anwendung kommt, sind Druck- und Schubkrafteinwirkung die gebräuchlichen Methoden. Fast in allen mechanischen Zerkleinerungsmaschinen treffen wir sie an (Bild 6.71.). Die Zugkraftwirkung findet man z. B. im Reißwolf.

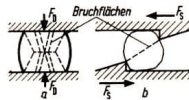


Bild 6.71.
Methoden der
Stoffzerkleinerung
durch a Druck-
und b Schubkräfte

Maschinen zur Stoffzerkleinerung mittels Druckkräften. Die Wirkungsweise der Stoffzerkleinerung mittels Druckkräften finden wir in Backen-, Walzen-, Kegel-, Schlagprallbrechern usw.

6.3.3. Maschinen zur Durchführung der Stoffumformungsprozesse

6.3.3.1. Maschinen zum Stoffzubereiten

Die Stoffzubereitungstechnik hat innerhalb der chemischen wie auch in der mechanischen Produktion die Aufgabe, den Ausgangsstoff für den Produktionsprozeß vorzubereiten. Das geschieht durch *Auflösen* der bisherigen Form eines Stoffes durch Überführen in einen zusammenhanglosen pulverisierten, körnigen, faserigen, plastischen oder flüssigen Zustand, durch *Scheiden* der Stoffanteile nach der Größenordnung oder nach verschiedenen spezifischen Eigenschaften und durch *Mischen* der Anteile von verschiedenen Ausgangsstoffen im festen, flüssigen oder plastischen Zustand. Das *Wirkungsprinzip beim Auflösen* der bisherigen Form eines Stoffes ist die Überwindung seiner Zusammenhängekräfte durch mechanische, thermische, elektrische oder andere Energieformen. Die Überwindung der Zusammenhängekräfte eines Stoffes durch mechanische Energie kann mittels

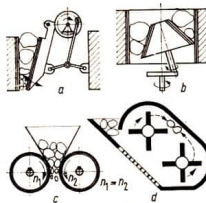


Bild 6.72.
Wirkungsweise
der Stoffzerkleinerung
mittels Druckkräften
im a Backen-, b Kegel-,
c Walzen- und d
Schlagprallbrecher

Diese Maschinen werden durch den gleichen Vorgang an der Wirkungsstelle produktionstechnisch charakterisiert, obwohl ihnen unterschiedliche Gestaltungs- und Bewegungsformen eigen sind (Bild 6.72.). Die Druckkraftwirkung kann durch einen Kniehebel, durch einen exzentrisch geneigten umlaufenden Kegel, durch zwei gegenläufige Walzen oder durch den Zusammenprall gegeneinander geschleuderter Stoffteile erzeugt werden.

Maschinen zur Stoffzerkleinerung mittels Schubkräften. Die Wirkungsweise der Stoff-

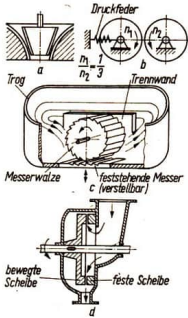


Bild 6.73. Wirkungsweise der Stoffzerkleinerung mittels Schubkräften in der Kegelmühle (a), Walzenmühle (b), im Holländer (c) und Feinschleifer (d)

zerkleinerung mittels Schubkräften wird hauptsächlich in Maschinen zur Weichzerkleinerung angewandt, z. B. in Mahlwerken, Holländern, Feinschleifern, Zerfaserern usw. Die Arbeitsorgane sind in diesen Maschinen paarweise angeordnet und erzeugen eine Schubbewegung zwischen einem feststehenden und einem drehenden Teil.

Maschinen zum Mischen. Das Mischen geschieht durch das wiederholte Gegeneinanderbewegen der Stoffanteile. Feste Stoffe in der Form von pulverigen, körnigen oder stückigen Anteilen werden in umlaufenden Mischtrommeln mit Einbauten oder Mischkästen gemischt. Durch die Umwälzbewegung wird der Mischvorgang hervorgebracht (Betonmischer). Zum Mischen flüssiger Stoffe können ebenfalls umlaufende Mischtrommeln eingesetzt werden. Charakteristische Mischer für Flüssigkeiten sind die Rührwerke. Durch umlaufende Rührarme wird die Flüssigkeit in einem Mischgefäß umgewälzt oder verwirbelt (Bild 6.74.). Die Qualität der Mischung bestimmt die gleichmäßige Verteilung der Stoffanteile in der Gesamtmasse. Sie ist abhängig sowohl von der Mischgeschwindigkeit als auch von der Mischdauer.

Die Mischbewegungen werden den Gefäßen oder Rührarmen über oftmals komplizierte Getriebe erteilt.

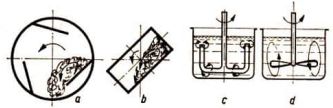


Bild 6.74. Wirkungsweisen von Mischmaschinen für feste (a, b) und flüssige (c, d) Stoffe: a Mischtrommel, b Mischkasten, c Ankerrührwerk, d Propellermischer

Das Mischen von plastischen Massen, z. B. Teig, Weichgummi, keramischen Massen, erfolgt mit Knetern (z. B. Knetter der Küchenmaschine).

6.3.3.2. Maschinen zum Urformen

Zu den Maschinen zum Urformen gehören sowohl die Formmaschinen als auch die Gießmaschinen in der Gießerei, die Kunststoffpressen und Plastspritzmaschinen, Glasblasmaschinen und Keramikpressen, aber auch z. B. die Formgutpressen von Teigwaren oder Kernseifen usw.

Ausgehend vom Wirkungsprinzip des Urformvorganges erzielen die Wirkungsweisen dieser Maschinen immer die Formgebung eines formlosen festen, plastischen oder flüssigen Ausgangsstoffes, in dem er unter Druckeinwirkung in eine vorgegebene konkave oder konvexe Form gepreßt wird. Durch Erstarren oder Aushärten nimmt der Stoff schließlich die Gestalt der Form an (Stoffschluß). Feste Ausgangsstoffe erhalten ihren Stoffzusammenhalt auch infolge der plastischen Verformung unter hohem Druck (Formschluß), z. B. beim Kaltpressen von Metallpulver.

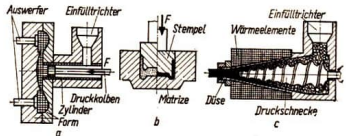
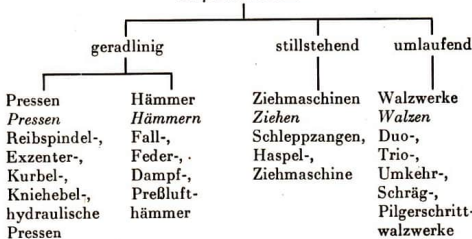


Bild 6.75. Wirkungsweisen von Urformmaschinen. a Zylinder-Druckkolben: Druckgießmaschine, b Matrize-Stempel: Kunststoffpresse, c Düse-Druckschnecke: Plastspritzmaschine



Umformmaschinen



Unterscheidungs-
merkmale:

Werkzeugbewe-
gung

Wirkungsweise
Wirkungsmecha-
nismen und Pro-
duktionsmittel

Übersicht 6.76.: Arten der Umformmaschinen (Druck-, Zug- und Zugdruckumformung)

6.3.3.3. Maschinen zum Umformen

Die Fertigungsverfahren der Umformtechnik lassen sich unter Einwirkung von Druck- oder Zugkräften und Biege- oder Torsionsmomenten als

Druckumformen, z. B. Fließpressen, Stanzen oder Walzen,
 Zugdruckumformen, z. B. Tiefziehen zylindrischer Teile,
 Zugumformen, z. B. Streckziehen oder Drahtziehen,
 Biegeumformen, z. B. Abkanten oder Einrollen,
 Schubumformen, z. B. Verwinden,
 mit Maschinen durchführen. Die Umformmaschinen sind ausschließlich Werkzeugmaschinen.

Nach der Werkzeugbewegung unterscheiden sich die Arten der Umformmaschinen.

Pressen. Die Pressen erzeugen eine Druckkraftwirkung und werden deshalb zur Durchführung der Verfahren zum Druck- und Zugdruckumformen eingesetzt.

Nach dem Antrieb unterscheiden sich die Pressenarten. Mechanisch betriebene Pressen sind die Reibspindel-, Exzenter-, Kurbel- und Kniehebelpressen. Den Antrieb bilden hierbei Bauteile zur Umformung der mechanischen Energie von der Drehbewegung in hin- und hergehende Bewegung, die mechanischen Getriebe. Außerdem gibt es Pressen, die die hydraulische Energieumformung

im Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder-Kolben anwenden, die hydraulischen Pressen. Bei ihnen wird der Druck entweder durch Druckwasser oder Drucköl übertragen (Bild 6.77.).

Hämmer. Die Hämmer verrichten ebenfalls durch Druckwirkung Umformarbeit. Sie wird beim Fallhammer dadurch erzeugt, daß der Hammerbär von einem Antrieb angehoben wird und aus einer bestimmten Höhe herabfällt. Im Aufschlagmoment wandelt sich die Bewegungsenergie des fallenden Bären um in Umformarbeit am Werkstoff. Der Bär kann durch Zugmittel, Druckkraft und Dampfdruck gehoben werden.

Zwecks Vergrößerung der Umformarbeit kann man den herabfallenden Bären noch eine zusätzliche Bewegungsenergie durch Federkraft oder durch Dampf- oder Luftdruck erteilen.

Ziehmaschinen. Bei Ziehmaschinen wird über den bereits umgeformten Werkstoff eine Zugkraft übertragen, die den Ziehvorgang bewirkt. Der umzuformende Werkstoff erfährt unter der Zugkrafteinwirkung in der Ziehöse eine Querschnittsminderung.

Die Zugkraft kann durch Greifereinrichtungen (z. B. Schleppzange bei Rohr-, Formstangen- und Streckziehmaschinen) oder über Wickelvorrichtungen (z. B. Ziehtrom-

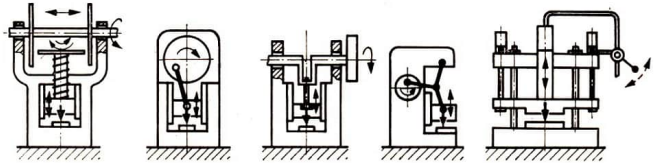


Bild 6.77. Pressenarten: Reibspindelpresse, Kurbelscheibenpresse, Kurbelpresse, Kniehebelpresse, hydraulische Presse (von links nach rechts)

mel bei Drahtziehmaschinen) aufgebracht werden.

Walzwerke. In Walzwerken kommt der umzuformende Werkstoff unter der Druckkraftwirkung des Walzenpaares zum Fließen. Je nach Profilierung der Mantelfläche kann das Walzgut zu verschiedenen Profilen geformt werden. Durch entsprechende geometrische Anordnung der Walzen ist auch das Herstellen von Ringen und Rohren möglich.

6.3.3.4. Maschinen zum Trennen

Das Wirkungsprinzip beim Trennen ist die Überwindung des Stoffzusammenhalts (Kohäsionskräfte) unter Einwirkung mechanischer, chemischer, thermischer, elektrischer oder anderer Energie. Maschinen zum mechanischen Trennen sind die Scheren, Schneidautomaten, Pressen mit Schnittwerkzeugen, die spanabhebenden Werkzeugmaschinen einschließlich Schleifmaschinen und Ultraschallbearbeitungsmaschinen. Während das chemische Trennen ebenfalls maschinell durchführbar ist, wird das thermische Trennen heute zum Teil in der Serienfertigung mit Brennschneidemaschinen durchgeführt (z. B. im Schiffbau). Gegenwärtig erobern sich die Elektroerosionsmaschinen eine wichtige Position unter den Werkzeugmaschinen.

Scheren. Das Wirkungspaar sind die Schermesser und der zu trennende Stoff. Die Schermesser können sich parallel oder geneigt gegenüberstehen, aber auch umlaufend als Rollenmesser angeordnet sein. Der

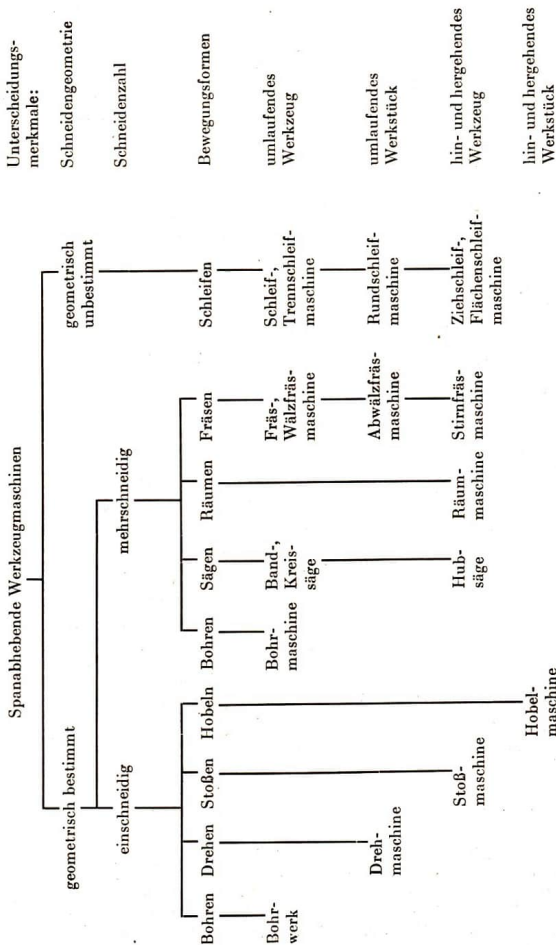
Schervorgang wird dadurch hervorgebracht, daß der Werkstoff zwischen den Schermessern Druckkrafteinwirkungen ausgesetzt ist und dabei seinen Zusammenhalt verliert, also zerteilt wird.

Zur Erzeugung der Druckkräfte können Scheren nach den gleichen Wirkungsweisen und mit den gleichen Wirkungsmechanismen aufgebaut sein wie Pressen.

Pressen. Das Schneiden und Lochen wird mit besonderen Werkzeugen unter Druckkraftwirkung durchgeführt. Diese Schnittwerkzeuge können in jede beliebige Pressenart (Bild 6.77.) eingebaut werden.

Spanabhebende Werkzeugmaschinen. Alle spanabhebenden Bearbeitungsverfahren sind durch den gleichen Vorgang an der Wirkungsstelle charakterisiert (Bild 6.1.a). Die Spanabnahme erfolgt durch das Eindringen einer keilförmigen Schneide in den Werkstoff. Nach der Schneidengeometrie des Werkzeuges, nach den Bewegungsformen des Werkzeuges und des Werkstoffes sowie nach der Bearbeitungsgeometrie unterscheiden sich die Verfahren und die darin eingesetzten Maschinen.

Während bei Dreh-, Bohr-, Fräs-, Schleif- und Läppmaschinen sowie auch bei Kreissägen und Bohrwerken eine Drehbewegung als Hauptbewegung erzeugt werden muß, ist lediglich bei Hubsägen, Räüm-, Stoß- und Hobelmaschinen die Hauptbewegung eine geradlinige hin- und hergehende Bewegung (Übersicht 6.78.). Die Drehbewegungen sind mit Rädergetrieben einfach zu erzielen, die hin- und hergehenden Be-



Übersicht 6.78.: Einteilung der spannabhebenden Werkzeugmaschinen nach den Merkmalen des Werkzeuges und des Werkstückes



wegungen erfordern jedoch bereits einen komplizierten technischen Aufwand (Bild 6.43.). Auch liegt die Arbeitsproduktivität bei umlaufenden Werkzeug- oder Werkstückbewegungen höher, weil die bei Hin- und Hergang benötigten Überlaufwege und Rückkehrbewegungen wegfallen. Deshalb werden, so es die Bearbeitungsgeometrie erlaubt, solche Verfahren bevorzugt.

Die Übereinstimmung der Wirkungsmechanismen für Maschinen mit umlaufenden Hauptbewegungen gestatten in ihrem Aufbau weitestgehend den Einsatz von Baugruppen und darüber hinaus die Kombination verschiedener Maschinenarten zu Taktstraßen. **Elektroerosionsmaschinen.** Die Bearbeitungsmethode des Abtrags der Teilchen von härtesten metallischen Werkstoffen oder das Herausarbeiten kompliziertester Formen ist elektroerosiv möglich. Das Werkstück wird dabei an eine Elektrode des Stromkreises gelegt, der an der Wirkungsstelle während des Fertigungsverganges durch Funkenübergang geschlossen ist. Das Werkzeug arbeitet als Gegenelektrode und erfährt in dem Maße eine Vorschubbewegung, wie die Abtragung der Metallteilchen durch Funken vonstattengeht. Führt das Werkzeug eine lineare Vorschubbewegung aus, dann bezeichnet man das Verfahren als Elektrofunktbohren; rotiert das Werkzeug, so nennt man es anodenmechanisches Schleifen. In der praktischen Anwendung unterscheiden sich beide in der Polung des Wirkungspaares und in der Verwendung von Hilfsmitteln (Elektrolyt und Dielektrikum). Die Maschinenbewegungen werden entweder durch mechanische Bauteile (Getriebe) oder durch elektromechanische Bauteile (Vibrator) dem Arbeitsorgan zugeführt.

6.3.3.5. Maschinen zum Fügen und Verbinden

Zur Herstellung von stoff- und formschlüssigen Verbindungen kommen ebenfalls Maschinen zum Einsatz. Ihre typischen Vertreter sind die Schweißmaschinen (Unter-Pulver-Schweißmaschinen, Wider-

stands- und Induktionspreßschweißmaschinen, Punktschweißmaschinen), Klebmaschinen (Faltschachtelklebmaschinen, Furnierverleimmaschinen), Nietmaschinen (Drucknietmaschinen, Niethämmer), Heftmaschinen (Draht- und Fadenheftmaschinen), Schraubenanziehmaschinen und -lösemaschinen, Nähmaschinen und die Ma-

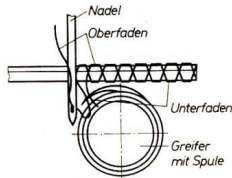


Bild 6.79. Nadel und Greifer einer Nähmaschine

schinen zur Herstellung von Textilien (Webmaschinen, Wirk- und Strickmaschinen, Nähwirkmaschinen). Kraftschlüssige Verbindungen werden mittels Pressen hergestellt.

6.3.3.6. Maschinen zum Beschichten

Das Beschichten von Körperoberflächen mit Metall kann in galvanischen Bädern von Trommelmaschinen, Glockenapparaten und bei großen Werkstücken in Tauchanlagen vorgenommen werden. Maschinen, die nach dem Tauchverfahren arbeiten, dienen auch zur chemischen Beschichtung von Werkstückoberflächen (Aloxid-, MBV-Verfahren) oder zum Tauchen in Metallschmelzen (Weißblechherstellung).



Bild 6.80. Auftragwalze

Das Beschichten durch Sprühverfahren wird ebenfalls maschinell angewandt, z. B. in Bogenlackiermaschinen. Das größte Anwendungsgebiet haben die Maschinen zum Beschichten bei der Herstellung von poly-



graphischen Erzeugnissen als Druckmaschinen (Tiegeldruckpressen, Schnellpressen und Rollenrotationsmaschinen).

6.3.4. Maschinen zur Durchführung der Transportprozesse

Eine wichtige Rolle bei der Mechanisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse spielen die maschinell durchgeführten inner- und außerbetrieblichen Versorgungsprozesse. Im innerbetrieblichen Transport werden Hebezeuge und -maschinen, Maschinen zum Fördern von Stück- und Schüttgut, Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten und zum Fördern und Verdichten von Gasen eingesetzt. Der außerbetriebliche Transport wird in der Hauptsache mit Fahrzeugen durchgeführt.

6.3.4.1. Hebezeuge und -maschinen

Kleinhubige Hebezeuge. Zur Überwindung kleiner Hubhöhen (bis 400 mm) kommen Zahnstangen-, Schraubenwinden- und Druckwasser-Hebeböcke zur Anwendung. Die Zahnstangenwinden werden über Stirnrädergetriebe und Zahngesperre meist mittels Handkurbel angetrieben. Die Schraubenwinden nutzen Bewegungsschrauben mit Selbsthemmung. Das Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder-Kolben erzeugt die Kraftwirkung und Hebebewegung bei Druckwasser-Hebeböcken, wobei das Druckwasser den Kolben aus dem Zylinder verdrängt.

Flaschenzüge. Mittlere Hubhöhen (3 m bis 10 m) bewältigen Flaschenzüge. Gewöhnliche Flaschenzüge sind *Faktorenflaschenzüge*. *Schraubenflaschenzüge* werden über Schneckenradgetriebe bewegt. *Stirnradflaschenzüge* arbeiten mit ein- oder mehrfachen Stirnradübersetzungen. Elektroflaschenzüge ermöglichen mit Drahtseil über Rollenzug genau senkrechte Lastbewegung. Das Seil wird auf einer Trommel aufgewunden (Elektroseilzug).

Winden und Aufzüge. Unter Ausnutzung

von Hebelwirkungen arbeiten die Winden (Bild 6.81.). Die einfach wirkende Winde dient nur zum Heben kleiner Lasten. Durch Vorgelege (z. B. Stirnradgetriebe) wird die Kraftwirkung erhöht. Winden für große Lasten sind mit Bremsen zum Regeln der Lastabsenkgeschwindigkeiten und mit Sperrwerken zum Festhalten der Last ausgestattet. Winden werden als Hubwerke in Aufzügen, Laufkatzen und Kranen verwendet.

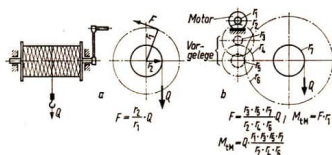


Bild 6.81. Kräfteverhältnisse an der Winde: a ohne, b mit Vorgelege

Die Lastaufnahmemittel sind Lasthaken und Lastbügel zum Befestigen von Stückgütern, Lasthebemagnete für magnetische Schüttgüter, Kistengreifer, Greifzangen, Klappgefäße mit Boden- oder Seitenentleerung, Klappmulden oder Stangengreifer.

Krane. Als Krane werden Hebemaschinen bezeichnet, die außer der Hubbewegung auch noch Fahr- oder Schwenkbewegungen ausführen können, z. B. Kranbahnen, Turmdrehkrane, Portalkrane, Bockkrane und Kabelkrane.

6.3.4.2. Förderer für Schütt- und Stückgut

Schütt- und Stückgut kann im innerbetrieblichen Transport mit Flurförderern (z. B. gleisgebundenen Loren oder gleislos in Handfahrzeugen, Motorfahrzeugen und Elektrokarren), mit Hängebahnen oder mit Stetigförderern transportiert werden (z. B. Kratzenförderer, Förderrinnen, Förderrutschen, Förderschnecken, Bandförderer und Becherwerke). Für Schüttgüter kommen auch pneumatische und hydraulische Förderer in Anwendung, die auf Grund des Impulsaustausches wirken. Die Antriebsmaschinen sind dazu Pumpen und Lüfter.



Für Stückgüter verwendet man Hängebahnen mit pendelndem Gehänge, Rollenbahnen (über die z. B. Kisten ohne Antrieb Abwärtsbewegungen ausführen können), Schleppkettenförderer oder Standbahnen mit Transportwagen (z. B. in automatischen Maschinenfließreihen mit aufgespanntem Werkstück).

6.3.4.3. Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten

Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten nutzen sowohl das Prinzip der Stoffverdrängung durch Kolbenverschiebung als auch den Impulsaustausch (Bilder 6.82. und 6.83.).

Die Stoffverdrängung durch Kolbenverschiebung ist die Umkehrung der Wirkungsweise im Wirkungspaar Druckmedium und Zylinder-Kolben der Energieumformungsmaschine. Die Kolbenverschiebung wird hierbei genutzt zur Volumenverdrängung ΔV , und die Kolbenkraftwirkung, bezogen auf die Kolbenfläche, ergibt eine Druckerhöhung Δp , die die Förderhöhe der Flüssigkeit bestimmt. Pumpen, die nach dieser Wirkungsweise arbeiten, sind z. B. die Kolbenpumpen, Flügelpumpen und Zahnradpumpen.

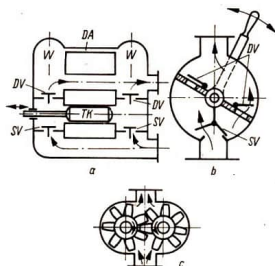


Bild 6.82. Pumpen mit der Wirkungsweise der Stoffverdrängung: a doppelwirkende Tauchkolbenpumpe, b Flügelpumpe, c Zahnradpumpe

Den Impulsaustausch nutzen alle Strömungsmaschinen, so z. B. die Kreisel-

pumpe, Axialpumpe und Strahlpumpe, und zwar ebenfalls in Umkehrung zu den Strömungsmaschinen der Energieumformung.

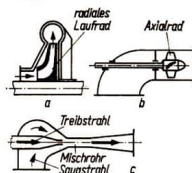


Bild 6.83. Pumpen mit der Wirkungsweise des Impulsaustausches: a Kreiselpumpe, b Axialpumpe, c Strahlpumpe

6.3.4.4. Maschinen zum Fördern und Verdichten von Gasen

Die Maschinen zum Fördern und Verdichten von Gasen nutzen ebenfalls die Umkehrung der Wirkungsweise der Energiemaschinen, z. B. die Kolbenverschiebung in Kolbenverdichtern und den Impulsaustausch in Radial- und Axialverdichtern. Infolge der Kompressibilität zeigt sich die Verdichtungsarbeit in einer Druckerhöhung und Volumenverminderung. Gleichzeitig tritt mit dem Verdichten der Gase eine starke Wärmetönung auf, der durch Kühlung des verdichteten Gases entgegengewirkt werden muß. Während das Fördern und Verdichten auf niedrige Druckverhältnisse von Gasen in einstufigen Maschinen erfolgt, wird das Verdichten auf ein hohes Druckverhältnis sowohl in Kolben- als auch in Radial- und Axialverdichtern mehrstufig vorgenommen. Die Kühlung des Gases ist dabei meist nach der zweiten oder auch nach jeder Verdichtungsstufe vorgesehen (Zwischenkühler).

6.3.5. Maschinen zur Durchführung der Stoffumwandlungsprozesse

Die Maschinen zur Durchführung der Stoffumwandlungsprozesse müssen die technische Realisierung von chemischen Verfahren gewährleisten. In den Chemieanlagen machen Maschinen und Apparate, in



denen verfahrenstechnische Grundoperationen und chemische Reaktionen stattfinden, etwa 20...40% des Investitionswertes aus. Der überwiegende Anteil der Anlagen besteht aus Maschinen zum Stoffzubereiten (Abschnitt 6.3.3.1.) und Maschinen zur Durchführung der Transportprozesse (Abschnitt 6.3.4.) mit den dazugehörigen Rohrleitungen, Meß-, Steuer- und Regelungseinrichtungen sowie anderen Hilfsmitteln zum Fördern von Gasen, Flüssigkeiten, Feststoffen, Gemischen und der Durchführung von Transportvorgängen im molekularen Bereich.

Die mechanisch wirkenden Maschinen, die Vorgänge der *Stoffformung* ausführen, wie z. B. Brecher, Mühlen, Zerstäuber, Granulier- und Brikettiermaschinen, werden ergänzt durch Apparate zum Verflüssigen, Sublimieren, Schmelzen und Erstarren, die in ihrem Grundaufbau röhren- oder wannenförmige Gefäßsysteme darstellen, mehr oder weniger mit Transportsystemen gekoppelt sind und die Einwirkung von thermischer Energie auf den Stoff gestatten. Die Apparate übernehmen damit die Funktion von Trägerorganen für gasförmige, feste und flüssige Stoffe, die die Wirkungsstelle umgeben. In gleicher Weise werden die Maschinen und Apparate der *Stofftrennung*, die für die mechanischen Vorgänge Sieben, Sichten, Klassieren, Filtern, Zentrifugieren und Abschneiden (Hydrozyklonieren) eingesetzt werden, ergänzt durch thermisch und elektromagnetisch wirkende Apparate zum Verdampfen, Trocknen, Kristallisieren, Destillieren, Extrahieren, Lösen, Ab-, Ad- und Desorbieren sowie zur Durchführung von Elektrophorese, Elektroosmose, Elektrodialyse, Magnetabscheidung und Gasreinigung. Für die Durchführung der Vorgänge zur *Stoffvereinigung* stehen neben Mischern, Knetern und Rührmaschinen noch Gefäßsysteme zum Lösen sowie zum Sammeln und Lagern in der Form von Behältern, Tanks und Silos zur Verfügung.

Zur *Wärmeübertragung* dienen Wärmeüber-

trager, Verdampfer, Kühler und Kondensatoren.

Die Produktionssysteme der Stoffumwandlungsprozesse erreichen die höchste Effektivität. Aus etwa 30 natürlichen Rohstoffen erzeugen sie etwa 300 anorganische und 20000 organische Produkte. Ihre kontinuierliche Produktionsmenge mit Fließkapazitäten bis etwa 10^{30} Moleküle je Tag bleiben von anderen Produktionssystemen unerreicht [5].

6.3.6. Maschinen zur Durchführung der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse

Die Besonderheiten der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse verlangen die Unterscheidung der Maschinen in Landmaschinen für den Feldbau und Maschinen für die Innenwirtschaft.

6.3.6.1. Landmaschinen für den Feldbau

Hierzu gehören die Maschinen und Geräte für die Bodenbearbeitung — zum Lockern des Bodens (Pflug, Egge, Grubber, Ackerschleppse) und zum Verdichten des Bodens (Walze, Krumenpacker), Maschinen und Gerät zum Ausbringen von Stall- und Mineraldünger (Stalldung- und Mineraldüngerstreuer), Maschinen und Geräte zur Pflege von Pflanzenkulturen und zur Schädlingsbekämpfung, Erntemaschinen — Maschinen für die Hackfruchternte u. a. Die Landmaschinen für den Feldbau werden heute meist mit Zugmaschinen (Schleppern) bewegt. Die Zugmaschinen stellen dabei immer den Energieteil dar. Die Schlepper können aber auch als Geräteträger ausgebildet sein. Die Anbaugeräte lassen sich je nach Arbeitsweise zwischen Vorder- und Hinterachse, hinter der Hinterachse und vor der Vorderachse anbringen. Diese Anbaumöglichkeiten gestatten das Ausführen von mehreren Arbeiten in einem Arbeitszug.



6.3.6.2. Maschinen und Geräte für die Innenwirtschaft

Zur Mechanisierung der Innenwirtschaft stehen z. B. zur Verfügung: Kartoffelwäscher, Futterdämpfer, Kartoffelquetsche, Rübenschneider, Häckselmaschine, Futterreifer, Schrotmühle, Melkmaschine, Milchkühler usw.

6.3.7. Maschinen zur Durchführung der Informationen verarbeitenden Prozesse

So wie es dem Menschen gelang, den Stoff- und Energiefluß durch technische Systeme zu beherrschen, so ersann er auch Möglichkeiten, den Informationsfluß durch technische Mittel zu seiner Entlastung von monotoner geistiger Arbeit zu gestalten. In allen Bereichen des täglichen Lebens treffen wir heute Maschinen an, die der Weiterleitung, Speicherung und Verarbeitung von Informationen dienen. Diese technischen Systeme reichen vom Telefon über Rundfunk und Fernsehen, Tonbandgerät und Kinofilm, Registrierkasse und Buchungsmaschine bis zum elektronisch arbeitenden Rechenautomaten, der dem Arzt beim Diagnostizieren hilft oder eine automatische Fabrik steuert.

6.3.7.1. Maschinen zum Weiterleiten von Informationen

Die Maschinen zum Weiterleiten von Informationen nutzen als Wirkungsenergie fast ausschließlich die Elektroenergie. Die älteste dieser Maschinen ist der Morsetelegraf, der auch heute noch in seiner ursprünglichen Wirkungsweise angewendet wird. Seine Weiterentwicklungen sind die Maschinentelegraphen und die Fernschreibmaschinen. Die Maschinen leiten die Informationen als *Stromstoßkombinationen* in einem elektrischen Leitungssystem weiter. Eine andere Wirkungsweise ist die Weiterleitung von Informationen mittels *elektromagnetischer Schwingungen*, wie sie im Fernsprechwesen genutzt wird. Die drahtlose Weiterleitung von Informa-

tionen ermöglicht das Funkwesen unter Verwendung *modulierter elektromagnetischer Schwingungen*, z. B. in Rundfunk, Fernsehen usw.

Hierzu siehe Elektrotechnik, Seite 216 ff., und Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Seite 287 ff.

Prinzipiell werden Informationen in jedem Stoff- und Energiefluß weitergeleitet, wobei physikalische, chemische und auch biologische Wirkungen die Informationen charakterisieren können.

6.3.7.2. Maschinen zum Speichern von Informationen

Die Maschinen zum Speichern von Informationen sind ebenfalls hauptsächlich elektromechanisch arbeitende Systeme, wie z. B. das *Magnettonband* zum Speichern elektromagnetischer Schwingungen. Die Wirkungsweise zum Speichern von Informationen in *magnetischen Zuständen von Ferrielementen* ist heute Grundlage zum Bau von Maschinenspeichern, z. B. für Datenverarbeitungsmaschinen. Die Informationsspeicherung kann auch optisch auf Filmstreifen oder mechanisch auf Lochstreifen vorgenommen werden.

Die Maschinen zum Speichern von Informationen haben die Aufgabe, die zu speichernden Informationen mittels einer Wirkungsenergie umzusetzen und den physikalischen Zustand eines Speichermechanismus zu verändern.

Dem Vorgang des Speicherns sind die Vorgänge der Informationsaufnahme und -wiedergabe zugeordnet. Diese Funktionen können jedoch verschiedenen Maschinen und Geräten übertragen werden.

6.3.7.3. Maschinen zum Verarbeiten von Informationen

Die Mechanisierung und Automatisierung monotoner geistiger Arbeit wird mittels Informationen verarbeitender Maschinen durchgeführt. Die in einer solchen Maschine eingegebenen Informationen werden entweder



nach einem der Wirkungsweise dieser Maschine zugrunde liegenden festen Programm verarbeitet oder in komplizierten Maschinen mit variablen Programmen je nach den Erfordernissen behandelt.

Die modernsten Maschinen dieser Art sind die elektronischen Rechenmaschinen, die sowohl monotone geistige Arbeit aus dem Bereich der Verwaltungsarbeit oder Rechenbüros ausführen als auch in modernen automatisierten Produktionsprozessen die Kommandomaschinen darstellen können.

Die Informationen verarbeitenden Maschinen ermöglichen eine Steigerung der Arbeitsproduktivität und Erhöhung der Effektivität der Informationsprozesse. Maschinen rechnen beispielsweise um das Tausendfache schneller und genauer als die besten Mathematiker. Mit diesen Maschinen können also die Informationen verarbeitenden Prozesse an schnell ablaufende Produktionsprozesse angepaßt und zu deren selbsttätigen Steuerung benutzt werden.

6.3.8. Maschinen in der automatisierten Produktion

Die automatisierte Produktion unterliegt einer ständigen Entwicklung. Sie beginnt mit der Automatisierung einzelner technologischer Vorgänge und endet mit der Umgestaltung eines Industriebetriebes in eine automatische Fabrik.

Die Automatisierung einzelner technologischer Vorgänge ist dadurch gekennzeichnet, daß der Mensch die Maschine (Werkzeugmaschine, Apparat, Aggregat) in einen Automaten umgestaltet, der selbständig alle Bearbeitungsoperationen am Werkstoff nach einem vorher vom Menschen festgelegten Programm ausführt.

Die nächste Entwicklungsstufe der Automatisierung ist die Verkettung einzelner Automaten mittels Transporteinrichtungen zu einer Produktionseinheit, zu einer automatischen Maschinenfließreihe. Damit kann bereits ein Teilprozeß automatisiert sein. Eine weitere Automatisierungsstufe ist die

Umgestaltung aller Teilprozesse einer Abteilung in automatische Maschinenfließreihen und deren Verbindung zu einem einheitlichen Komplex. Das bedeutet allerdings die Lösung komplizierter Organisationsprobleme und die Einbeziehung von Hilfsdiensten (Werkzeugwechsel) in dieses automatische System. Oftmals bleibt jedoch der Hilfsdienst mit den üblichen Mitteln den Menschen überlassen, und damit ist der Prozeß nur teilautomatisiert. Können die automatischen Produktionskomplexe mit ihren Fließtechnologien einer einheitlichen organisatorischen Leitung unterstellt werden, dann wird durch die Einbeziehung aller Hilfsdienste (Reparatur, Energieversorgung, Transport usw.) und die Automatisierung der Leitung des Produktionsprozesses selbst die Umgestaltung des Industriebetriebes in eine automatische Fabrik gegeben.

Während die Automatisierung einzelner technologischer Vorgänge durch einfache Steuerprogramme möglich ist, lassen sich die automatisierten Komplexe und ebenso die gesamte automatische Fabrik von Kommandomaschinen (Informationen verarbeitende Maschinen) steuern.

Bereits in den automatischen Maschinenfließreihen verliert die klassische Maschine ihre herkömmliche Bedeutung. Sie ist nur mittels besonderer Steuer- und Fördermechanismen arbeitsfähig. Die eigentliche Arbeitsmaschine geht in ein Arbeitsorgan des gesamten automatischen Komplexes über.

Die Verkettung einzelner automatisierter Maschinen bringt schon komplizierte Aufgaben bei der Lösung des automatischen Transportes und der Probleme der selbsttätigen Aufnahme und Abgabe der Werkstücke mit sich. So verändert sich meist das Stützpaar im Vergleich zur manuell bedienten Maschine, z. B. Werkzeugmaschinen in automatischen Maschinenfließreihen benutzen Spannvorrichtungen als Transportwagen.

In der Komplexautomatisierung wird teilweise schon die Umgestaltung des Wir-



kungspaars verlangt. Noch tiefgreifender muß der technologische Vorgang dort verändert werden, wo die von manuellen Fertigungsabläufen abgeleiteten mechanischen Wirkungsweisen keine Erhöhung der Arbeitsproduktivität mehr ermöglichen. Die maschinentechnische Gestaltung des Produktionsvorganges verlangt dann die Anwendung des gleichen Wirkungsprinzips mittels anderer Wirkungsweisen, d. h. das Ablösen der mechanischen durch elektro-mechanische, pneumatische, hydraulische oder gar optische und strahlungstechnische Wirkungsweisen. Das zeichnet sich gegenwärtig deutlich ab beim Einsatz von Meßmitteln. Unter der Einwirkung neuer Erkenntnisse der Wissenschaften finden wir diese Umgestaltung auch am produktions-technischen Vorgang. So kann beispielsweise in der Umformtechnik die bisher unter großem Maschinenaufwand durchgeführte Umformung großflächiger Blechteile jetzt durch Explosionsumformung in einem einfachen Behältersystem erfolgen, oder in der Baumwollspinnerei wird die komplizierte und nur mechanisch arbeitende Ringspinnmaschine durch hochproduktive Aggregate für das pneumatische Spinnen ersetzt. Der kostspielige Aufwand an Mechanismen kommt durch eine einfache, dem Wirkungsprinzip genügende Führung des Stoff- und Energieflusses zum Wegfall. Hierin liegt auch die Begründung für die Entwicklungstendenz der Stoffformungsprozesse hin zur *maschinenlosen Produktion* im klassischen Sinne des Begriffs Maschine, zu einem Stand der Automatisierung der Produktion, wie er uns in den Stoffumwandlungsprozessen schon seit mehr als fünf Jahrzehnten bekannt ist. Die mit komplizierten Mechanismen ausgestattete Maschine entwickelt sich dabei zu konstruktiv einfach aufgebauten Apparaten und Aggregaten mit hohem Leistungsvermögen. Gleichartige Beispiele können auch bei der Durchführung von Energieumwandlungsprozessen angeführt werden, z. B. Umwandlung von chemischer in elektrische Energie in Brennstoffzellen.

Diesen Auswirkungen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, die sich in den Veränderungen der herkömmlichen technischen Systeme besonders bei der Entwicklung der automatischen Produktion zeigen, muß auch die moderne Auffassung der Maschinenlehre gerecht werden. Deshalb sollte die konstruktive beschreibende Betrachtungsweise der Maschine ersetzt werden durch eine schöpferische Ableitung der konstruktiven Gesetzmäßigkeiten aus den technologischen Wirkungen innerhalb des Produktionsprozesses unter Berücksichtigung ökonomischer und gesellschaftlich bedingter Forderungen.

6.4. Quellennachweis und weiterführende Literatur

6.4.1. Im Text verwendete Literatur

- [1] Direktive des IX. Parteitag des SED zum Fünfjahrplan für die Entwicklung der Volkswirtschaft der DDR in den Jahren 1976 bis 1980. Dietz Verlag Berlin 1976.
- [2] Programm der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands. Dietz Verlag Berlin 1976.
- [3] Pauli, D.: Lehrmaterialien für Maschinenlehre (nicht veröffentlichtes Material, PH Güstrow).
- [4] Fuchs, H.: Arbeitsblätter Allgemeine Maschinenlehre. VEB Verlag Technik, Berlin 1977.
- [5] Taschenbuch Maschinenbau, Band 2: Energieumformung und Verfahrenstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.

6.4.2. Weiterführende Literatur

Taschenbuch Maschinenbau, Band 1: Grundlagen; Band 2: Energieumformung und Verfahrenstechnik; Band 3: Stoffumformung. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.

Grundwissen des Ingenieurs. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1974.

Fachwissen des Ingenieurs, Band 1: Grundlagen des Konstruierens; Band 2: Grundlagen der Automatisierung; Band 3: Fertigungstechnik – Fertigungsmittel; Band 4: Kraft- und Arbeitsmaschinen – Kältemaschinen; Band 5: Elektrotechnik – Elektronik; Band 6: Energie- und Stoffumwandlung; Band 7: Stahlbau, Förder-, Bau- und Landmaschinen; Band 8: Verkehrsmittel, Straßenfahrzeuge – Schienengebundene Fahrzeuge – Schiffbau und Schiffsmaschinen – Luftfahrzeuge. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1976.



Reihe: Wissenspeicher für Technologen; Maschinenelemente — Fertigungstechnik — BMSR-Technik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1973.

Reihe: Maschinenteile, Band 1: Verbindungselemente; Band 2: Achsen — Wellen — Lager — Kupplungen; Band 3: Hülltriebe und Reibradtriebe; Band 4: Zahnräder, Band 5: Schubkurbelgetriebe; Band 6: Rohrleitungen und Rohrleitungsarmaturen. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1976.

Kurth, F.; G. Pajer; M. Scheffler: Grundlagen der Fördertechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.

Kurth, F.: Stetigförderer. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.

Hain, K.: Getriebeatlas für verstellbare Schwing-Dreh-Bewegungen. VEB Verlag Technik, Berlin 1969.

Gnilke, W.: Lebensdauerberechnung von Maschinenelementen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1976.

Hintze, J.: Maschinenelemente, Baugruppen und ihre Montage. Teil 1: Verbindungselemente; Teil 2: Übertragungselemente. VEB Verlag Technik, Berlin 1978.

Fuchs, H.: Arbeitsblätter Allgemeine Maschinenlehre. VEB Verlag Technik, Berlin 1977.

Ihbe, W.; J. Fischer; R. Malek: Wellenkupplungen — nichtschaltbare starre und bewegliche — schaltbare synchron und asynchron. VEB Verlag Technik, Berlin 1973.

Reeg, H.: Aufbau und Arbeitsweise von hydraulischen Getrieben. VEB Verlag Technik, Berlin 1973.

Rösicke, E.: Aufgaben, Aufbau, Arten, Beanspruchung und Einsatz von Schraubenverbindungen — Aufbau, Aufgaben, Anwendung und Beanspruchung von Stiftverbindungen, Aufgaben, Aufbau, Arten, Werkstoffe und Beanspruchung von Gleitlagern. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.

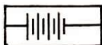
Frömert, H.: Aufgaben, Aufbau, Arten, Beanspruchung und Montage von Wälzlagern. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.

Bertram, K.: Unterscheidungsmerkmale, Arten, Gestaltung und Beanspruchung von Achsen, Wellen, Zapfen. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.

Lothmann, G.: Bezeichnen und Berechnen von Zahnradabmessungen. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.

Tietböhl, E.; K. Klingbeil; P. Fabarius: Aufgaben, Aufbau und Wirkungsweise von Stirnradgetrieben — Wirkungsweise, Arten und Übersetzungsverhältnisse von Reibradgetrieben — Wirkungsweise und konstruktive Gestaltung von Schneckengetrieben. VEB Verlag Technik, Berlin 1973.

Bernhard, F.: Wirkungsweise und Berechnung von Schubkurbelgetrieben und schwingenden Kurbelschleifen — Aufbau, Anwendung und Berechnung von Kurbelgetrieben. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.



7. Elektrotechnik

verfaßt von Dr. P. Pfeiffer

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt
\mathfrak{B} (B)	magnetische Induktion
C	Kapazität
D	Verschiebungsflußdichte
d	Abstand
E	elektrische Ursprungsspannung
\mathfrak{E} (E)	elektrische Feldstärke
f	Frequenz
\mathfrak{H} (H)	magnetische Feldstärke
I	Stromstärke
i	Augenblickswert eines Stroms
\mathfrak{I}	komplexe Stromstärke
l	Länge
L	Induktivität
n	Drehzahl
N	Windungszahl
p	Polpaarzahl
P	Leistung
Q	Elektrizitätsmenge, elektrische Ladung
R	Ohmscher Widerstand
\mathfrak{R}	komplexer Widerstand
R_m	magnetischer Widerstand
t	Zeit
T	Periodendauer
u	Augenblickswert einer Spannung
U	Spannung[sabfall]
\mathfrak{U}	komplexe Spannung
v (v)	Geschwindigkeit
V	magnetischer Spannungsabfall
W	Energie
η	Wirkungsgrad
Θ	magnetische Ursprungsspannung
μ	Permeabilität
ϱ	spezifischer Widerstand
φ	Phasenverschiebung
Φ	Magnetfluß
Ψ	Verschiebungsfluß
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ω	Kreisfrequenz

7.1. Grundlagen der Elektrotechnik

7.1.1. Vom Wesen der Elektrizität

Die Elektrotechnik nutzt die Bewegung von Elektrizitätsmengen für die verschiedensten Zwecke aus. Die Träger der Elektrizitätsmengen (Ladungsträger) sind Elektronen (Elektrizitätsquanten) oder Ionen (geladene Atombzw. Molekülteile).

Für die Leitung ist die Struktur der Stoffe entscheidend. Es gibt

1. Leiter

- Metalle mit freien Elektronen (Elektronengas),
- dissoziierte Stoffe (in Ionen zerfallene Moleküle);

2. Halbleiter (die Elektronen sind im allgemeinen nicht frei beweglich, können jedoch ausgetauscht werden; vgl. Seite 267);

3. Isolatoren (Stoffe mit überwiegender Atombindung; in ihnen sind keine Ladungsträger verschiebbar).

Äußere Kennzeichen eines elektrischen Stroms sind Wärme, Magnetfeld und Stofftransport, denn

— beim Durchgang eines elektrischen Stroms durch einen Leiter oder einen Halbleiter wird im allgemeinen elektrische Energie in Wärmeenergie umgesetzt (s. Seite 216),

— jeder Strom ist von einem *Magnetfeld* begleitet (s. Seite 221),

— fließt ein Strom durch einen Elektrolyten, so erfolgt die Bewegung der Ladungsträger dadurch, daß sich die Ionen zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden bewegen und sich dort entladen — es wird also ein *Stoff* transportiert.

Ursache für eine Bewegung von Ladungsträgern sind Ladungsunterschiede. Sie werden durch die Bewegung von Elektronen bzw. Ionen ausgeglichen. Die Stromrichtung ist entgegengesetzt zur Strömungsrichtung der negativen Ladungsträger bzw. in Richtung der Bewegung positiver Ladungsträger (Elektronenmangelträger) definiert.

Hat der Strom gleichbleibende Richtung, so nennt man ihn Gleichstrom.

Die Stellen, zwischen denen der Ladungsunterschied besteht, heißen Pole. Den Pol mit einem Überfluß an negativen Ladungsträgern bezeichnet man durch das Zeichen „-“ (Minuspol), den Pol, an dem ein Mangel an negativen Ladungsträgern herrscht (das ist gleichbedeutend mit einem Überfluß an positiven Ladungsträgern), bezeichnet man durch das Zeichen „+“ (Pluspol).



7.1.2. Elektrische Größen und ihr Zusammenhang

Stromstärke. Die Stromstärke I an der Querschnittsstelle A eines Leiters ist der Quotient aus der Elektrizitätsmenge Q , die in einer Zeiteinheit durch den Querschnitt A strömt, und der Zeit t :

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Für einen zeitlich nicht gleichbleibenden Strom gilt:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Einheit der Stromstärke: Ampere (A), siehe auch S. 7 ff.
Größenvorstellung:

Lichtbogenöfen	bis 300 000 A
Stromaufnahme der Elektromotoren von Nahverkehrsmitteln	100 A
Stromaufnahme einer 100-Watt-Glühlampe	0,445 A
Antennenströme von Empfangsanlagen	einige μ A

Betrachtet man einen unverzweigten Stromkreis (siehe S. 217), so ist die Stromstärke in allen Querschnitten des Leiters, durch den dieser Kreis gebildet wird, gleich. Der Strom kann folglich als ein Band ohne Anfang und ohne Ende betrachtet werden. Das ist die Haupteigenschaft des elektrischen Stroms. Als seine Richtung definiert man die Richtung vom Pluspol zum Minuspol, d. h. die Bewegungsrichtung eines positiven Ladungsträgers (technische Stromrichtung).

Spannung. Die Spannung U ist diejenige physikalische Größe, die die Ladungsträger antreibt. Man hat zwischen zwei Spannungsformen zu unterscheiden:

1. **Urspannung E** (das ist die in einer Spannungsquelle erzeugte Spannung) und
2. **Spannungsabfall U** (das ist die Wirkung einer Ursprung über eine Strecke, in welcher der durch die Ursprung angetriebene Strom fließt — Spannungsabfallstrecken treten in Verbrauchern auf).



Bild 7.1.
Schaltzeichen einer Urspannungsquelle

Zusammenhang zwischen beiden Spannungsformen:

Beim Lauf eines Ladungsträgers durch eine Spannungsquelle erhält dieser Energie in Form elektrischer Antriebsenergie; durchläuft er eine Spannungsabfallstrecke, so gibt er diese Energie wieder vollständig ab.

Kennzeichen der Spannung:

1. **Stromantrieb** (die zwischen Anfang und Ende eines Leiters liegende Spannung treibt einen Strom durch den Leiter) und
2. **mechanische Kräfte** (entgegengesetzt geladene Leiterstücke, die durch einen Isolator getrennt sind, ziehen einander an).

Einheit der Spannung: Volt (V).

Größenvorstellung:

Spannung zwischen Wolke und Erde, bevor ein Ladungsausgleich durch einen Blitz erfolgt	über 10^6 V
Hochspannungsleitung	bis $5 \cdot 10^6$ V
Leitnetz	220 V

Akkumulatorzelle 2 V
Spannung zwischen Antenne und Erde eines Rundfunkempfängers um 10^{-6} V

Man bezeichnet Spannungen bis 42 V als Kleinspannungen, bis 1000 V als Niederspannungen und über 1000 V als Hochspannungen.

Als Richtung einer Ursprung definiert man die Richtung, in die sie einen Strom anzutreiben sucht. Als Richtung des Spannungsabfalls definiert man die Richtung vom Pluspol zum Minuspol (genauer: die Richtung, in der ein positiver Ladungsträger bei seiner Bewegung seine elektrische Energie abgibt).

Widerstand. Der Widerstand ist die physikalische Größe, die das Widersetzen gegen den Stromdurchgang charakterisiert.

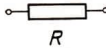


Bild 7.2.
Schaltzeichen eines Widerstandes

Der Widerstand R eines Körpers zwischen den Punkten A und B ist gleich dem Quotienten aus dem Spannungsabfall U über AB und der Stromstärke I des dabei durch AB fließenden Stroms:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Der Widerstand R ist in der Regel bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen von der Stromstärke unabhängig (Ohmsches Gesetz).

Zur Berechnung eines Ohmschen Widerstandes (ein Widerstand, der das Ohmsche Gesetz befolgt) gilt die sogenannte Bemessungsgleichung:

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

in der ρ eine Materialkonstante (spezifischer Widerstand), l die Länge des Widerstandes und A der konstante Querschnitt des Widerstands bedeuten. Zu beachten ist, daß die Materialkonstante ρ temperaturabhängig ist.

Einheit des Widerstandes: Ohm (Ω).

Größenvorstellung (in $\Omega \cdot m$ bei $20^\circ C$)

Erde	$10^3 \Omega m$
Kohlenstoff für Schichtwiderstände	$3 \cdot 10^{-5} \Omega m$
Eisen	$10^{-7} \Omega m$
Aluminium	$29 \cdot 10^{-9} \Omega m$
Kupfer für Leitzwecke (Elektrolytkupfer)	$17 \cdot 10^{-9} \Omega m$
Silber	$16 \cdot 10^{-9} \Omega m$

Elektrische Energie. Die elektrische Energie in einem Stromkreis ist in der Summe konstant. Es erfolgt ein Energietransport von den Ursprungsquellen zu Spannungsabfallstrecken mit elektrischer Energie als Zwischenform.

Es gilt

$$W = \int_t^t U \cdot I \cdot dt.$$

(Eigentlich müßte hier zwischen Ursprungsstellen und Spannungsabfallstrecken unterschieden werden.)

Einheit der Energie: Joule (J) oder Wattsekunde ($W \cdot s$). Darüber hinaus sind die häufig benutzten Ein-



heiten der Wattsekunde ($W \cdot h$) und Kilowattstunde ($kW \cdot h$) zulässig. Es gilt:

$$1 J = 1 W \cdot s = 0,2778 \cdot 10^{-6} kW \cdot h$$

Elektrische Leistung. Nach der Definitionsgleichung der Leistung gilt:

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R.$$

Einheit der Leistung: Watt (W) bzw. Kilowatt (kW).

Größenvorstellung:

Karbidofen (Reduktionsofen)	$3 \cdot 10^7 W = 30 MW$
Straßenbahn	$10^5 W = 100 kW$
Tauchsieder	$10^3 W = 1 kW$
Glühlampen	15 W bis 200 W
Telefonhörer	$10^{-3} W = 1 mW$

7.1.3 Berechnungen an Stromkreisen

Der unverzweigte Stromkreis (Bild 7.3.) besteht aus der Urspannungsquelle E und dem Verbraucherwiderstand R_A . Es gilt: $E = I \cdot R_A = U$.

Kreise, in denen mehrere Spannungsquellen und mehrere Verbraucher auftreten, lassen sich nicht auf so einfache Art berechnen (Bild 7.4.). Kreise, in denen z. B. Spannungsquellen und mehrere Verbraucher, die in Reihe oder parallel geschaltet sind, auftreten, heißen verzweigte Kreise.

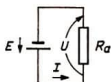


Bild 7.3.
Unverzweigter Stromkreis

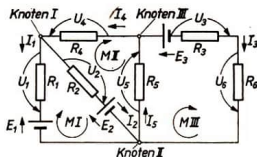


Bild 7.4. Vermaschter Stromkreis

Ihre Berechnung unterscheidet sich nur wenig von den sogenannten vermaschten Kreisen, in denen verschiedene Kreise miteinander gekoppelt sind. Stellen, an denen mehrere unverzweigte Kreise zusammenstoßen, heißen Knotenpunkte. Die einzelnen unverzweigten Kreise heißen Maschen. In einer Masche wird ein beliebiger Durchlaufsinns festgelegt. Alle Spannungen in Richtung des Durchlaufsinns werden positiv gezählt, alle anderen negativ. In Bild 7.4. wird die Masche I durch folgenden Kreis gebildet: E_1, R_1, R_2, E_2 ; die Masche II umfaßt: E_2, R_2, R_4, R_5 . Dieselben Spannungsquellen und Verbraucher können in vermaschten Kreisen also gleichzeitig Elemente verschiedener Maschen sein. Zur Berechnung vermaschter Kreise dienen die beiden Kirchhoffschen Gesetze:

$$\sum I_{\text{hin}} = \sum I_{\text{weg}} \quad (1. \text{ Kirchhoffsches Gesetz})$$

Die Summe aller zu einem Knotenpunkt hinfließenden Ströme ist gleich der Summe der wegfließenden Ströme.

Beispiel (Bild 7.5.): $I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$.

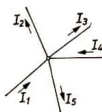


Bild 7.5.
Zum 1. Kirchhoffschen Gesetz

$$\sum E_M = \sum U_M \quad (2. \text{ Kirchhoffsches Gesetz})$$

In einer Masche ist die Summe aller vorzeichenbehafteten Urspannungen gleich der Summe aller vorzeichenbehafteten Spannungsabfälle.

Beispiel (Bild 7.6.): $E_1 - E_2 = U_1 + U_2 + U_3$.

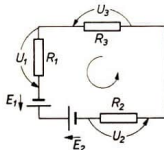


Bild 7.6.
Zum 2. Kirchhoffschen Gesetz

Mit Hilfe dieser Sätze können alle vermaschten und alle verzweigten Stromkreise berechnet werden. Bei der Berechnung der Schaltung von Bild 7.4. geht man auf folgende Weise vor:

a) In das Schaltbild zeichnet man die vermuteten Richtungen der Ströme und die Zählpfeile der Urspannungen und Spannungsabfälle ein. (Die Zählpfeile der Spannungsabfälle liegen in Richtung des Stroms, der den Spannungsabfall erzeugt.)

b) Man wendet den Knotenpunktsatz an und erhält mehrere Gleichungen.

$$\text{Beispiel: Knoten I: } I_4 = I_1 + I_2 \quad (*)$$

$$\text{Knoten II: } I_1 + I_2 + I_3 = I_5 \quad (++)$$

$$\text{Knoten III: } I_5 = I_4 + I_3 \quad (+++)$$

Diese drei Gleichungen sind nicht voneinander unabhängig, sondern nur zwei von ihnen, die jeweils dritte erhält man durch Verknüpfen der beiden anderen.

c) Man wendet den Maschensatz auf jede Masche an und erhält, damit so viele Gleichungen, wie man Maschen hat.

$$\text{Beispiel: Masche I: } E_1 - E_2 = -U_1 + U_2 \quad (')$$

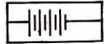
$$\text{Masche II: } E_2 = -U_3 - U_4 - U_5 \quad (')$$

$$\text{Masche III: } -E_3 = U_3 + U_6 + U_8 \quad (''')$$

Diese Gleichungen sind voneinander unabhängig.

d) Man löst das entstandene Gleichungssystem. Sollen Ströme oder Widerstände berechnet werden, schreibt man statt der Spannungsabfälle die jeweiligen Produkte $I \cdot R$.

e) Ergibt sich bei der Lösung beispielsweise für einen errechneten Strom eine negative Größe, so bedeutet das,



daß die angenommene Stromrichtung falsch war. Das gleiche gilt für die Spannungsabfälle. Ist ein errechneter Widerstand negativ, so wurden ebenfalls die Richtungen der Ströme falsch angenommen.

In Stromkreisen kommen häufig Zusammenschaltungen von Verbrauchern vor, in denen keine Ursprungsquellen enthalten sind. Eine derartige Schaltungsanordnung zwischen zwei Polen, in der keine Ursprungspannung enthalten ist, heißt passiver Zweipol. Man kann sich diese Zusammenschaltung von Widerständen durch einen Widerstand ersetzt denken, der durch folgende Gleichung definiert wird:

$$R_{\text{ers}} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}}$$

Dieser Ersatzwiderstand kann leicht berechnet werden. Bei der Berechnung hat man zwischen zwei Grundtypen zu unterscheiden.

Reihenschaltung (Bild 7.7.):



Bild 7.7.
Reihenschaltung
von Widerständen

$$R_{\text{ers}} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2$$

Diese Gleichung kann auf beliebig viele Glieder erweitert werden.

Parallelschaltung (Bild 7.8.):

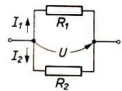


Bild 7.8.
Parallelschaltung
von Widerständen

$$R_{\text{ers}} = \frac{U}{I_1 + I_2} \text{ bzw. } \frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{\text{ers}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Analog kann diese Gleichung auf beliebig viele Glieder erweitert werden.

In den bisherigen Feststellungen wurde außer acht gelassen, daß jede Spannungsquelle einen inneren Widerstand besitzt, den man messen könnte, wenn man den Antrieb durch einen Kurzschluß ersetzt. Diesem Umstand trägt man dadurch Rechnung, daß man im Ersatzschaltbild einer Spannungsquelle in Reihe zu der Ursprungsquelle einen Ersatzwiderstand R_i zeichnet. Eine derartige Ersatzspannungsquelle wird als aktiver Zweipol bezeichnet.

Der Grundstromkreis hat danach folgendes Schaltbild (Bild 7.9.).

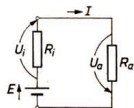


Bild 7.9.
Grundstromkreis

Es gilt:

$$\begin{aligned} U_i &= I \cdot R_i \\ U_a &= I \cdot R_a \\ E &= U_a + U_i = I(R_a + R_i) \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$I = \frac{E}{R_a + R_i} = \frac{E}{R_{\text{ges}}}, \quad U_a = I \cdot R_a = \frac{E \cdot R_a}{R_a + R_i}$$

Gilt $R_a \gg R_i$, so ist $U_a \approx E$. Diesen Fall bezeichnet man als *Leerlauf*, weil dann für den Wirkungsgrad gilt:

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} = \frac{U \cdot I}{E \cdot I} = \frac{U}{E} = \frac{R_a}{R_i + R_a} \approx 1$$

Ein großer Wirkungsgrad ist für die Starkstromtechnik besonders wichtig.

Gilt $R_a \ll R_i$, so ist $I \approx \frac{E}{R_i} = I_k$. Diesen Fall bezeichnet man als *Kurzschluß*.

In der Schwachstromtechnik soll häufig eine möglichst große Leistung übertragen werden. Hier ist der Fall $R_i \approx R_a$ von besonderer Bedeutung:

$$P_a = \frac{U^2}{R_a} = \left(\frac{E^2 \cdot R_a}{(R_i + R_a)^2} \right) \cdot \frac{1}{R_a} = \frac{E^2 \cdot R_a}{(R_i + R_a)^2}$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = E^2 \cdot \frac{R_i^2 - R_a^2}{(R_a + R_i)^4} = 0$$

Daraus folgt schließlich: $R_i^2 = R_a^2$ bzw. $R_i = R_a$.

Hier gilt $U_i = U_a = \frac{E}{2}$. Dieser Fall wird als *Anpassung* bezeichnet.

Mit Hilfe der Zweipole kann man in einem noch so komplizierten Netzwerk den Strom durch eine Strecke \overline{AB} berechnen (Zweipoltheorie).

Man bestimmt $I_{AB} = \frac{E_{\text{ers}}}{R_{i_{\text{ers}}}}$. E_{ers} findet man als Leerlaufspannung U_1 , wenn man den Widerstand R_{AB} herausrennt (Bild 7.10.).

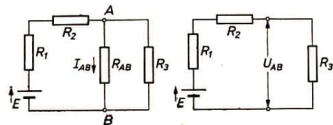


Bild 7.10. Beispiel zur Ersatzspannungsquelle

$$E_{\text{ers}} = U_1 = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$R_{i_{\text{ers}}}$ findet man, wenn man die Ursprungsquellen durch Kurzschlüsse ersetzt und in die über AB aufgetrennte Schaltung hineinmißt (Bild 7.11.).

$$\frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = R_{i_{\text{ers}}}$$

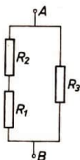


Bild 7.11.
Beispiel zum Ersatzwiderstand

7.1.4. Elektrisches Feld

In elektrischen Isolatoren sind keine oder nur wenige bewegliche Ladungsträger (Elektronen oder Ionen) vorhanden. Jedoch treten auch in Isolatoren elektrische Erscheinungen auf.

Ein Schaltelement, das Leiter und Nichtleiter verbindet, heißt Kondensator. Im allgemeinen besteht ein Kondensator aus zwei Metallplatten (Elektroden), zu denen Leiter führen, sowie aus einem Isolator, der zwischen diesen Platten liegt (Bild 7.12.). Legt man an einen Kondensator eine Spannung, so besitzt jeder Punkt des Isolators gegenüber einem beliebigen gewählten Bezugspunkt eine Spannung. Diese Verteilung von Spannungen bezeichnet man als Spannungsfeld. Legt man einen Schnitt durch einen Kondensator und verbindet Punkte gleicher Spannung (gleichen Potentials), erhält man das Bild des Spannungsfeldes (Bild 7.13.).



Bild 7.12.
Kondensator



Bild 7.13.
Spannungsfeld
eines Kondensators

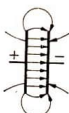


Bild 7.14.
Feldstärkefeld
eines Kondensators

Neben dem Spannungsfeld gibt es ein weiteres Feld, das Feldstärkefeld. Die Feldstärke \mathcal{E} (in $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) in einem Punkt des Feldes gibt an, wie sich die Spannung ändert, wenn man sich von diesem Punkt aus einem anderen Punkt mit niedrigerem oder höherem Potential nähert. Es gilt:

$$\mathcal{E} = \frac{dU}{ds},$$

wobei ds das Wegelement in Richtung größter örtlicher Spannungsänderung ist. Das Feldstärkefeld in einem Kondensator hat das in Bild 7.14. gezeigte Aussehen. Ändert man die Spannung an den Platten eines Kondensators, so ändert sich auch das Potential jedes Punktes im Isolator.

Man kann nun auf experimentellem Wege nachweisen, daß bei dieser Änderung im Isolator ein Magnetfeld auftritt, das Hauptkennzeichen des Stroms ist. Deshalb wird diese Erscheinung in Isolatoren (Dielektrikum) als dielektrischer Strom I_D bezeichnet. Ein an eine Spannung gelegter Kondensator trägt auf den Oberflächen der Elektroden entgegengesetzte Ladungen Q (in C oder $\text{A} \cdot \text{s}$; $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$). Man sagt, der Kondensator besitzt die Ladung Q .

Von der Ladung $+Q$ (der einen Platte) geht der Verschiebungsfluß $\Psi = Q$ aus und mündet in einer Gesamtladung $-Q$ (der anderen Platte). Der Verschiebungsfluß hat Stromcharakter. Als Verschiebungsdichte bezeichnet man die Änderung des Verschiebungsflusses, bezogen auf die Änderung der Fläche des Kondensators:

$$\phi = \frac{d\Psi}{dA}.$$

Zwischen Verschiebungsflußdichte und Feldstärke besteht die Beziehung:

$$\phi = \epsilon \cdot \mathcal{E}.$$

Der Proportionalitätsfaktor ϵ ist eine Materialkonstante und wird als Dielektrizitätskonstante bezeichnet. Er wird angegeben in $\frac{\text{As}}{\text{Vcm}}$. Für $\frac{\text{C}}{\text{V} \cdot \text{m}}$ (es ist die Einheit der Kondensatorkapazität) schreibt man F (Farad, nach Faraday). Für die Dielektrizitätskonstante gilt:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r,$$

worin $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ist.

Stoff	Vakuum	Luft	Wasser	Glimmer	Papier	Keramik
ϵ_r	1	1,0006	80	5 bis 10	1,8 bis 2,6	2 bis 3000

Ein Kondensator ist ein Speicher von Elektrizitätsmengen.

Für die Aufnahmefähigkeit (Kapazität) eines Kondensators gilt:

$$C = \frac{Qc}{Uc}.$$

Aus dieser Gleichung erhält man als Einheit das Farad ($1\text{F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$). Für jeden Kondensator gilt die folgende Bemessungsgleichung:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d},$$

in der A die Fläche der Kondensatorplatten und d ihr Abstand voneinander (bzw. die Dicke des dazwischenliegenden Dielektrikums) bedeuten.

Zwischen Spannung und Strom an einem Kondensator gilt der folgende Zusammenhang:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C \cdot U)}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Ströme treten in Kreisen mit Kapazitäten nur auf, wenn sich die Spannung ändert, also nur, wenn Wechselströme oder Schaltvorgänge auftreten.



Schaltungsarten:

Parallelschaltung (Bild 7.15.):

$$Q = Q_1 + Q_2; U = U_1 = U_2;$$

$$\frac{Q}{U} = \frac{Q_1}{U_1} + \frac{Q_2}{U_2}; C_{\text{ers}} = C_1 + C_2.$$



Bild 7.15.

Parallelschaltung von Kapazitäten

Reihenschaltung (Bild 7.16.):

$$U = U_1 + U_2; Q = Q_1 = Q_2;$$

$$\frac{U}{Q} = \frac{U_1}{Q_1} + \frac{U_2}{Q_2} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}; C_{\text{ers}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

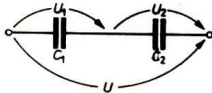


Bild 7.16.

Reihenschaltung von Kapazitäten

Diese Gleichungen können so erweitert werden, daß sie auf Schaltungen mit beliebig vielen Kapazitäten anwendbar sind.

7.1.5. Magnetismus

Der Magnetismus ist der Ausdruck für einen besonderen Zustand des Raumes, der sich z. B. durch Kraftwirkung auf Eisenteile äußert.

Dieser Zustand kann für ein räumlich begrenztes Raumteil auf zweierlei Weise hervorgerufen werden:

1. durch Wirkung eines Dauermagneten,
2. durch Wirkung eines Elektromagneten.

Quantitativ besteht zwischen den Wirkungen beider Magnete kein Unterschied; man kann sogar durch Einwirken eines Elektromagneten auf bestimmte Stoffe, z. B. Stahl, Dauermagnete erzeugen.

Die Natur des Magnetismus ist hauptsächlich auf folgenden zurückzuführen:

1. den Atombau (die betreffenden Atomsorten bilden als Folge eines unbesättigten Elektronenspins atomare Magnete),
2. den Kristallbau (die atomaren Magnete beeinflussen sich so stark, daß sie sich innerhalb von Bezirken der Materie, den sogenannten *Weißschen* Bezirken, gegenseitig so weit parallel ausrichten, als es die Temperaturbewegung zuläßt),
3. die Richtbarkeit der resultierenden *Bezirkmagnete* durch ein äußeres Feld.

Magnetfluß. Der Magnetfluß Φ ist die magnetische Erscheinung, die sich im magnetischen Kreis (analoges Gebilde zum elektrischen Kreis) in jedem Gesamtquerschnitt mit gleicher Stärke ausbildet (Stromcharakter). Als positive Richtung des Magnetflusses wurde diejenige definiert, in die der Nordpol einer Magnetnadel weist, wenn die Magnetnadel in den Magnetfluß gebracht wird (Bild 7.17.).

Der Fluß außerhalb einer magnetischen Spannungsquelle verläuft also vom Nordpol zum Südpol. Einheit der Flußstärke: Weber (Wb) oder Voltsekunde (Vs). Früher wurde die Einheit Maxwell (M) verwendet. Es gilt:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} = 10^8 \text{ M}.$$



Bild 7.17. Zur Definition der Richtung des Magnetflusses

Magnetische Spannung. Die magnetische Spannung ist die Größe, die den Magnetfluß antreibt. Sie tritt in den beiden folgenden Formen auf: magnetische Ursprungsspannung Θ und magnetischer Spannungsabfall V . Eine magnetische Ursprungsspannung kann auf zweierlei Arten erzeugt werden:

1. durch Permanentmagnete (Dauermagnete),
 2. durch elektrischen Strom (stromdurchflossene Spule).
- Über einer Strecke \overline{AB} , über der eine magnetische Ursprungsspannung liegt, tritt ein magnetischer Spannungsabfall auf, d. h. die Spannung, die zum Durchtreiben des Magnetflusses erforderlich ist. Als Richtung der magnetischen Spannung wurde die Richtung des angetriebenen Flusses festgelegt.

Einheit der magnetischen Spannung: Ampere (A).

Trotz gleicher Einheiten sind Stromstärke und magnetische Spannung völlig wesensfremd. (Diese Einheit folgt aus der Definition der magnetischen Spannung mit Hilfe von Energie und Fluß, $V = \frac{dW}{d\Phi}$.)

Magnetischer Widerstand. Der magnetische Widerstand R_m eines Körpers ist die Größe, die sein Widersetzen gegen den Durchgang des Magnetflusses charakterisiert. Es gilt entsprechend dem elektrischen Fall:

$$R_m = \frac{V}{\Phi}.$$

Die Einheit des magnetischen Widerstandes wird dann: Ampere je Weber $A \cdot \text{Wb}^{-1}$. Die Einheit des magnetischen Leitwerts (reziproker Widerstand) ist Weber je Ampere $\text{Wb} \cdot A^{-1}$. Für diesen Quotienten schreibt man meistens H (Henry). Also hat der magnetische Widerstand auch noch die Einheit H^{-1} .

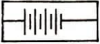
Analog zum elektrischen Fall gibt es auch eine Bemessungsgleichung für magnetische Widerstände:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}.$$

Hierin ist μ die magnetische Materialkenngröße, die Permeabilität. Es gilt:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r.$$

$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \approx 0,4 \pi \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ist die Permeabilität des Vakuums, μ_r ist eine einheitenlose Verhältniszahl. Für alle Stoffe, mit Ausnahme der Ferromagnetika, ist $\mu_r \approx 1$. Trägt man für diese Stoffe Φ über V auf, erhält man wie im Fall des Ohmschen Gesetzes eine Gerade. Für ferromagnetische Stoffe gilt $\mu_r \gg 1$, wobei μ_r keine Konstante ist. Als Fluß-



Spannung-Diagramm erhält man keine Gerade, sondern die sogenannte Hysteresiskurve (Bild 7.18.).

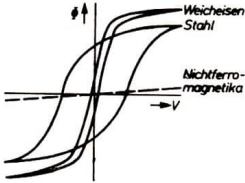


Bild 7.18. Φ -V-Diagramm von Nichtferromagnetika, Stahl und Weichen (Hysteresiskurve)

Gesetze am magnetischen Kreis

Analog den Kirchhoffschen Gesetzen elektrischer Stromkreise gelten für magnetische Kreise:

$$\Sigma \Phi_{\text{hin}} = \Sigma \Phi_{\text{weg}} \quad (1)$$

und

$$\Sigma \Phi = \Sigma V \quad (2).$$

Daraus folgt für den magnetischen Ersatzwiderstand einer Reihenschaltung (Bild 7.19.):

$$R_m = R_{m1} + R_{m2}$$

und

einer Parallelschaltung (Bild 7.20.):

$$R_m = \frac{R_{m1} \cdot R_{m2}}{R_{m1} + R_{m2}}.$$

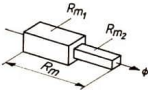


Bild 7.19. Reihenschaltung magnetischer Widerstände

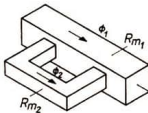


Bild 7.20. Parallelschaltung magnetischer Widerstände

Auch diese Gleichungen können so erweitert werden, daß sie auf Schaltungen mit beliebig vielen magnetischen Widerständen anwendbar sind.

Magnetisches Feld. Analog zum elektrischen Feld gibt es ein magnetisches Feld mit entsprechenden Größen. Die Flußdichte oder die magnetische Induktion \mathfrak{B} ist die das magnetische Feld kennzeichnende Strömungsgröße. Es gilt:

$$\mathfrak{B} = \frac{d\Phi}{dA},$$

worin dA das Flächenelement senkrecht zur Flußrichtung ist. Die Richtung von \mathfrak{B} fällt mit der Richtung des Teilflusses $d\Phi$ zusammen.

In einer engen langen stromdurchflossenen Spule durchsetzt der fast gleichbleibende Fluß Φ den konstanten Querschnitt, folglich herrscht in der Spule die Induktion

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{A} \quad (\text{homogenes lineares Feld}).$$

Einheit der Flußdichte: Tesla (T) oder Weber je Quadratmeter $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$. Es gilt $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$. (Früher wurde die Einheit Gauß (G) verwendet: $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.) Die magnetische Feldstärke wird analog zum elektrischen Fall als magnetisches Spannungsgefälle in Richtung größter Spannungsabnahme erklärt:

$$\mathfrak{H} = - \frac{dV}{ds},$$

worin ds das Linienelement in Richtung größter örtlicher Spannungsänderung ist. Die Richtung der magnetischen Feldstärke fällt zusammen mit der Richtung der größten Abnahme der magnetischen Spannung mit dem Ort. Einheit der magnetischen Feldstärke: $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ [Früher wurde die Einheit Oe (Oersted) verwendet: $1 \text{ Oe} = 79,5775 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.]

Beide Feldgrößen sind durch folgende Grundgleichung miteinander verknüpft:

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H}.$$

Stellt man \mathfrak{B} über Φ graphisch dar, so erhält man eine Kurve, die ähnlich ist der Fluß-Spannung-Kennlinie (Bild 7.18.).

7.1.6. Induktion

Gegeben sei eine Leiterschleife (Bild 7.21.), deren Querschnitt von einem Magnetfluß durchflutet werde. Ändert sich der Magnetfluß, der die Schleife durchsetzt, zeitlich, so entsteht in der Leiterschleife eine Spannung (die Spannung wird induziert), die bei geschlossenem Kreis einen Strom durch die Leiterschleife treibt (Bild 7.21.). Bleibt der Magnetfluß konstant, ändert sich aber der von ihm durchsetzte Querschnitt der Leiterschleife, wie das z. B. bei einer rotierenden Leiterschleife der Fall ist, so wird gleichfalls eine Spannung induziert, die einen Strom antreibt (Bilder 7.21. und 7.22.).

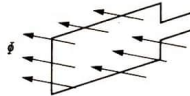


Bild 7.21. Induktion mit fester Leiterschleife und veränderlichem Fluß

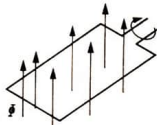


Bild 7.22. Induktion mit bewegter Leiterschleife und konstantem Fluß



Ändert sich die auf die Fläche bezogene Magnetflußstärke, die von einem geschlossenen Weg umfaßt wird, zeitlich, so tritt längs des Wegs eine elektrische Umlaufspannung U_0 auf:

$$E = U_0 = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Sofern diese Spannung nicht in einer einzelnen Leiterschleife, sondern in einer Spule mit N Windungen induziert wird, beträgt sie entsprechend:

$$E = - N \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

Diese Möglichkeit der Induktion (zeitlich veränderliches Magnetfeld, ruhende Leiter) wird in Transformatoren technisch genutzt.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß der magnetische Fluß, in dem sich die Leiterschleife befindet, konstant bleibt. Jedoch ändert sich die von der Leiterschleife gebildete Fläche so, daß sich der von ihr umfaßte Teil dieses Magnetflusses ebenfalls ändert (Bild 7.23.). Damit gilt:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} = - B \cdot \frac{dA}{dt} = - B \cdot l \cdot \left(- \frac{ds}{dt} \right) = B \cdot l \cdot v.$$

Hierin ist v die Geschwindigkeit des Leiters der Länge l gegenüber dem erregenden Feld.

Die vom Magnetfluß durchsetzte veränderliche Fläche ist leicht realisierbar, indem die Leiterschleife (bzw. eine Spule) in einem Magnetfeld rotiert, wobei die wirksame Fläche ihrer jeweiligen Projektion in Richtung des Magnetflusses entspricht. Dabei ist die Geschwindigkeit v des Leiters gleich der Umfangsgeschwindigkeit der Leiterschleife, und es ergibt sich für die induzierte Spannung E :

$$E = B \cdot l \cdot v = \frac{\Phi}{A} \cdot l \cdot 2\pi \cdot r \cdot n = c \cdot \Phi \cdot n.$$

Dieses Prinzip der Induktion (konstantes Magnetfeld, bewegte Leiter) wird in Generatoren technisch genutzt.

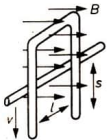


Bild 7.23.
Zum Induktionsgesetz in der Form $E = B \cdot v \cdot l$

Die Richtung des Stroms, der durch die induzierte Spannung angetrieben wird, kann man leicht nach der Dreifingerregel ermitteln (Bild 7.24.). (Die häufig angegebene Rechte-Hand-Regel oder Generatorregel ist dieser ähnlich und führt zu gleichem Ergebnis.)



Bild 7.24.
Veranschaulichung der Dreifingerregel

Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand bilden eine rechtwinklige räumliche Ecke. Man ordnet dem Daumen die Richtung der Bewegung, dem Zeigefinger die Richtung der Flußdichte und dem Mittelfinger die Richtung des durch die induzierte Spannung angetriebenen Stroms zu.

Wie bereits oben erwähnt, ruft jeder Strom, der einen Leiter durchfließt, ein Magnetfeld um diesen Leiter hervor. Auf die Untersuchung der Beziehungen zwischen den entsprechenden Größen muß hier verzichtet werden. Es soll lediglich erwähnt werden, daß sich die magnetische Ursprungung Θ einer Spule mit N Windungen mit Hilfe der folgenden Gleichung errechnen läßt:

$$\Theta = I \cdot N.$$

Selbstinduktion. Durch eine Spule mit N Windungen fließe der Strom I . Ändert er sich mit der Zeit t , so wird damit auch über dem sich ändernden Fluß $\frac{d\Phi}{dt}$ in der Spule eine Ursprungung E_{ind} hervorgerufen.

Nach Seite 221 ist diese Ursprungung derjenigen Spannung entgegengerichtet, die den Strom antreibt, von dem der Fluß verursacht wird. Für eine Spule gilt:

$$\Phi = \frac{I \cdot N}{R_m},$$

$$\text{daraus folgt: } \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N}{R_m} \cdot \frac{dI}{dt}$$

und

$$E = - N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{N^2}{R_m} \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Für den Quotienten $\frac{N^2}{R_m}$ (die Induktivität der Spule)

führt man das Symbol L ein und erhält für die von der Spule selbstinduzierte Spannung:

$$E = - L \frac{dI}{dt}.$$

Diese Gegenspannung ist durch eine Spannung U zu überwinden, wenn ein größer werdender Strom $\frac{dI}{dt}$ durch die Spule getrieben werden soll: $U = L \frac{dI}{dt}$.

Jede wirkliche Spule hat neben ihrer Selbstinduktivität L auch einen Ohmschen Widerstand. Für den Spannungsabfall über einer Spule gilt also: $U = I \cdot R + L \frac{dI}{dt}$.

Einheit der Induktivität:

Henry (H) oder Weber je Ampere ($\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$). Es gilt: $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1}$.

Schaltung von Induktivitäten:

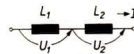


Bild 7.25.
Reihenschaltung von Induktivitäten

Reihenschaltung (Bild 7.25.):

$$U = U_1 + U_2; I = I_1 = I_2.$$

$$U = L_1 \frac{dI}{dt} + L_2 \frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dt} (L_1 + L_2).$$

$$L_{\text{ers}} = L_1 + L_2.$$

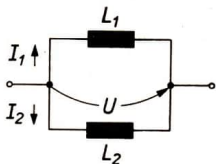


Bild 7.26. Parallelschaltung von Induktivitäten

Parallelschaltung (Bild 7.26.):

$$I = I_1 + I_2; U = U_1 = U_2.$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} = \frac{U}{L_1} + \frac{U}{L_2} = \frac{U}{L_{\text{ers}}}$$

$$L_{\text{ers}} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Ähnlich wie bei Ohmschen Widerständen und Kapazitäten können auch diese Gleichungen so erweitert werden, daß sie auf Schaltungen mit beliebig vielen Induktivitäten anwendbar sind.

7.1.7. Wechselstrom

Ströme, deren Stärke und deren Richtung wechseln, heißen Wechselströme. Ströme, die periodisch ihre Richtung oder Stärke wechseln, heißen periodische Wechselströme (Bild 7.27.).

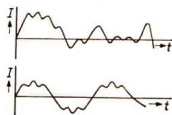


Bild 7.27.
I-t-Diagramme
von Wechselströmen

Unter den periodischen Wechselströmen spielen solche mit sinusförmigem Verlauf eine besondere Rolle (Bild 7.28.). Nichtsinusförmige periodische Wechselströme lassen sich durch *Fourier-Analyse* als eine Summe von sinusförmigen Wechselströmen unterschiedlicher Größe, Frequenz und Phasenlage zueinander darstellen.

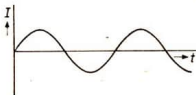


Bild 7.28.
I-t-Diagramm eines
sinusförmigen
Wechselstroms

Im folgenden werden sinusförmige Wechselströme näher betrachtet.

Abgesehen von der Form der Kurve spielt besonders die Häufigkeit eine Rolle, mit der sich in der Sekunde der periodische Vorgang wiederholt. Die Anzahl der Schwingungen (Perioden) in der Sekunde wird als Frequenz f bezeichnet.

Die Frequenz wird in Hertz (Hz) gemessen, dabei bedeutet 1 Hz eine Schwingung in der Sekunde. Es gilt: 1 Hz = 1 s⁻¹. Bezeichnet man die Zeit, die für eine Schwingung benötigt wird (die Periodendauer), mit T , so gilt:

$$f = \frac{1}{T}$$

Größenvorstellung:

Signale in Regelanlagen

0,1 bis 10 Hz

Lichtnetz

50 Hz

Frequenz der Träger-

schwingung bei Mittelwelle

5 · 10⁵ bis 17 · 10⁵ Hz

bzw. 500 bis 1700 kHz

Trägerschwingung von Radar-

impulsen

um 10¹⁰ Hz

bzw. um 10 GHz

Den Augenblickswert u einer sinusförmigen Wechselspannung kann man mit Hilfe der Gleichung

$$u = U_{\text{max}} \sin(\omega t + \varphi)$$

berechnen (Bild 7.29.).

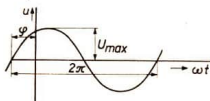


Bild 7.29. Augenblickswert einer sinusförmigen Wechselspannung

Für den Augenblickswert des Stroms gilt analog:

$$i = I_{\text{max}} \sin(\omega t + \varphi)$$

In diesen Gleichungen bedeutet ω die Kreisfrequenz;

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

φ ist der Phasenwinkel, der ein Maß für die Lage der Kurve (Spannungs- bzw. Stromkurve) auf der Zeitachse ist, U_{max} bzw. I_{max} sind die Maximalspannung bzw. der Maximalstrom oder die Amplitude. Auf den meisten Instrumentenskalen wird nicht die Maximalspannung bzw. nicht der Maximalstrom angezeigt, sondern der sogenannte Effektivwert (entspricht einem Gleichstrom gleicher Wirkung), der zeitliche quadratische Mittelwert:

$$U_{\text{eff}} = U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_{\text{max}}$$

bzw.

$$I_{\text{eff}} = I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_{\text{max}}$$

Der rechnerische Umgang mit sinusförmigen Wechselströmen ist nicht so einfach wie mit Gleichströmen. Deshalb hat man zwei Hilfen für die Darstellung und Berechnung von Wechselstromgrößen entwickelt.

Zeigerdarstellung. Sie geht davon aus, daß man sich das Bild der Sinusfunktion $u = U_{\text{max}} \sin(\omega t + \varphi)$ dadurch entstanden denken kann, daß ein Zeiger der Länge U_{max} mit der gleichförmigen Geschwindigkeit ω um



einen festen Punkt rotiert. Die Zeiger, die dem Zeitpunkt t_i entsprechen, werden parallel auf die Bezugsachse AB projiziert und ergeben den jeweiligen Funktionswert u_i an der Stelle t_i . Da in allen Fällen, in denen eine einheitliche Frequenz auftritt, Unterschiede in den Größen nur in U_{\max} (Zeigerlänge) oder φ (Phasenwinkel) bestehen, genügt die Angabe dieser beiden Größen. Der Zeiger wird also durch seinen Phasenwinkel φ und durch seine Länge (U_{\max} bzw. U) bestimmt (Bild 7.30.). Zeiger werden mit deutschen Buchstaben bezeichnet, neuerdings werden dafür auch lateinische Buchstaben verwendet.

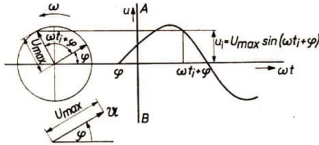


Bild 7.30. Zeigerdarstellung einer Wechselstromgröße

Komplexe Rechnung mit Wechselstromgrößen. Die komplexe Rechnung mit Wechselstromgrößen ist die mathematische Widerspiegelung des durch die Zeigerdarstellung wiedergegebenen physikalischen Sachver-

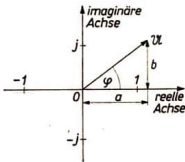


Bild 7.31.
Zeiger in der komplexen Ebene

halts. Man denkt sich die Zeiger in der komplexen Zahlenebene liegend (Bild 7.31.).

Der Phasenwinkel φ von dem Zeiger und dem positiven Teil der reellen Achse gebildet. Jeder Zeiger kann dann durch eine komplexe Zahl wiedergegeben werden:

$$U = a + bj$$

mit $a = U \cos \varphi$ und $b = U \sin \varphi$; j ist die imaginäre Einheit. Es gilt $j^2 = -1$.

(In der Mathematik wird im allgemeinen das Symbol i verwendet. Um Verwechslungen mit dem Augenblickswert i der Stromstärke zu vermeiden, wird das Symbol j in der Elektrotechnik bevorzugt.)

In der trigonometrischen Form gilt dann für den gleichen Zeiger:

$$U = U(\cos \varphi + j \sin \varphi),$$

in der Exponentialform:

$$U = U e^{j\varphi}.$$

Mit Zeigern und komplexen Größen können Rechenoperationen vorgenommen werden. Hierbei sind Regeln für komplexe Zahlen bzw. die Regeln für das graphische Rechnen mit Vektoren zu beachten.

Zum Beispiel werden zwei Zeiger addiert, indem man die Diagonale des von beiden Zeigern aufgespannten Parallelogramms als Summe beider Zeiger ermittelt (Bild 7.33.).

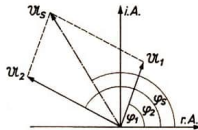


Bild 7.33. Addition zweier gleichartiger Wechselstromgrößen

Das Produkt der beiden Spannungen $u_1 = U e^{j\varphi_1}$ und $u_2 = U e^{j\varphi_2}$ erhält man unter Beachtung des entsprechenden Potenzgesetzes zu $u_1 u_2 = U^2 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}$.

Schaltelemente im Wechselstromkreis. Auf Grund der allgemeinen Gesetze verhalten sich Ohmsche Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten im Wechselstromkreis unterschiedlich. Die Übersicht 7.32. gibt über das Verhalten der einzelnen Schaltelemente Auskunft, siehe auch [1].

Anwendung der Rechnung mit komplexen Größen auf Wechselstromkreise. Diese Methode bietet wegen ihrer starken Formalisierung große Vorteile. Als Beispiel werde ein Reihenresonanzkreis (Bild 7.34.) betrachtet.

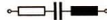


Bild 7.34. Reihenresonanzkreis

Für den komplexen Widerstand setzt man an:

$$\mathcal{R} = +R - \frac{j}{\omega C} + j\omega L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Daraus folgt:

$$Z = |\mathcal{R}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Der Scheinwiderstand wird ein Minimum (gleich dem Ohmschen Widerstand), wenn $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ gilt. Diesen Fall bezeichnet man als Resonanz. Formt man die Resonanzbedingung um, so erhält man eine Gleichung, mit deren Hilfe man die Resonanzfrequenz errechnen kann:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Fließt durch diesen Reihenresonanzkreis ein Strom $i = I \sin \omega t$, so treten die folgenden Spannungsabfälle auf:

$$u_R = i \cdot R = I \cdot R \cdot \sin \omega t;$$



Zweipol	Ohmscher Widerstand	Kapazität	Induktivität	
Schaltzeichen				
allgemeines Gesetz	$i = \frac{u}{R}$	$i = C \frac{du}{dt}$	$u = L \frac{di}{dt}$	
vorgegeben	$u = U_{\max} \sin \omega t$	$u = U_{\max} \sin \omega t$	$i = I_{\max} \sin \omega t$	
Ergebnis	$i = \frac{U_{\max}}{R} \sin \omega t$ $i = I_{\max} \sin \omega t$	$i = \omega C \cdot U_{\max} \cos \omega t$ $i = I_{\max} \cos \omega t$	$u = \omega L \cdot I_{\max} \cos \omega t$ $u = U_{\max} \cos \omega t$	
Bestimmungsstücke	Amplitude und Effektivwert	$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}; I = \frac{U}{R}$	$I_{\max} = \omega C \cdot U_{\max};$ $I = \omega C \cdot U$	$U_{\max} = \omega L \cdot I_{\max};$ $U = \omega L \cdot I$
	Frequenz	ω	ω	ω
	Phase	$\varphi_i - \varphi_u = 0 \text{ rad}$ $\varphi_u - \varphi_i = 0 \text{ rad}$	$\varphi_i - \varphi_u = 1,57 \text{ rad}$ $\varphi_u - \varphi_i = -1,57 \text{ rad}$	$\varphi_u - \varphi_i = 1,57 \text{ rad}$ $\varphi_i - \varphi_u = -1,57 \text{ rad}$
Kurve				
Zeigerbild				
Scheinwiderstand	$Z = \frac{U}{I}$	$Z = R$	$Z = \frac{1}{\omega C}$	$Z = \omega L$
Widerstandswinkel	$\angle(U, I) = \varphi_r = \varphi_u - \varphi_i$	$\varphi_r = 0 \text{ rad}$	$\varphi_r = -1,57 \text{ rad}$	$\varphi_r = 1,57 \text{ rad}$
Frequenzabhängigkeit				
kompl. Widerstand	R	$-\frac{j}{\omega C}$	$j\omega L$	

Übersicht 7.32.: Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten im Wechselstromkreis



$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L \cdot I \cos \omega t = \omega L I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right);$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I}{\omega C} \cdot \cos \omega t = \frac{I}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Bild 7.35. zeigt das danach gezeichnete Zeigerbild.



Bild 7.35.
Zeigerbild eines Reihen-
resonanzkreises

Zum gleichen Ergebnis gelangt man auch durch komplexe Rechnung:

$$U = R \cdot I \quad (\text{Ohmsches Gesetz in komplexer Form});$$

$$U = \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \cdot I;$$

$$U = R \cdot I + j \cdot \omega L I - j \frac{I}{\omega C}.$$

In der komplexen Ebene erhält man das gleiche Zeigerbild; die Berechnung ist jedoch einfacher.



Bild 7.36.
Widerstandsreieck
eines Reihenresonanz-
kreises

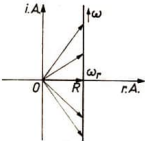


Bild 7.37.
 $R = f(j\omega)$ (Ortskurve)

Analog sieht das Widerstandsreieck (Bild 7.36.) aus, das aus dem Ergebnis der komplexen Berechnung folgt. Die Größe des Spannungsabfalls bzw. des komplexen Widerstands ist also frequenzabhängig. Die graphische Darstellung dieses Zusammenhangs in der komplexen Ebene (r.A.: reelle Achse; i.A.: imaginäre Achse) wird in der Elektrotechnik vielfach benutzt und wird als Ortskurve bezeichnet. Bild 7.37. zeigt die Ortskurve des Widerstands des Reihenresonanzkreises.

Als weiteres Beispiel soll der sogenannte Parallelresonanzkreis näher betrachtet werden. Seine Schaltung zeigt Bild 7.38.



Bild 7.38.
Parallelresonanz-
kreis

Für den Widerstand R gilt:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_C} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} - \frac{\omega C}{j} =$$

$$= \frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right).$$

Für den Strom folgt daraus:

$$I = \frac{U}{R} = U \cdot \frac{1}{R} = U \left[\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right].$$

Das Zeigerdiagramm zeigt Bild 7.39. Für R erhält man

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} = \frac{R}{1 + jR \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)}.$$

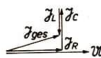


Bild 7.39.
Zeigerbild eines Par-
allelresonanzkreises

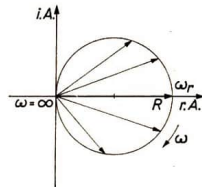


Bild 7.40.
 $R = f(j\omega)$ (Orts-
kurve)

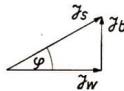


Bild 7.41.
Wirk- und Blind-
strom im Zeigerbild

Bild 7.40. zeigt die Ortskurve des Widerstands R .

Leistung bei Wechselstrom. Der Strom I durch einen Widerstand R in komplexer Darstellung setzt sich aus einem Anteil zusammen, der mit der Spannung in Phase liegt, und mit einem anderen, der gegenüber der Spannung um $1,57$ rad verschoben ist (Bild 7.41.). Das Produkt $U \cdot I_w$ bezeichnet man als Wirkleistung, weil hierbei im Wirkwiderstand wirkliche Energie umgesetzt wird. Das bedeutet, daß die dem Widerstand zugeführte Energie in eine andere Energieform (z. B. Wärme) umgeformt wird. Das Produkt $U \cdot I_q$ heißt Blindleistung, weil keine Energie wirklich umgesetzt wird, sondern nur eine pendelnde Energieumwandlung erfolgt. (Für L : magnetische Energie \leftrightarrow elektrische Energie; für C : dielektrische Energie \leftrightarrow elektrische Energie.) Ein Blindwiderstand gibt keine nutzbare Energie ab.

Aus dem Zeigerbild folgt dann:

$$P_w = U \cdot I_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi;$$

$$P_q = U \cdot I_q = U \cdot I \cdot \sin \varphi.$$



Das Produkt $U \cdot I$ heißt Scheinleistung P_s . Die Einheit der Leistung ist das Watt (w). (Vgl. hierzu S. 217) Sehr häufig werden aber zur Angabe einer Blindleistung der Begriff Var (var) verwendet. Es gilt:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} = 1 \text{ var.}$$

Für die Starkstromtechnik ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von besonderer Bedeutung, da er angibt, welcher Anteil der Scheinleistung wirklich in Nutzleistung umgesetzt werden kann. Man strebt einen möglichst großen $\cos \varphi$ an, um die Zuleitungen nicht mit hoher, nur pendelnder Blindleistung zu belasten. Zur Verbesserung des $\cos \varphi$ bei Anlagen mit hohen Induktivitäten (Elektromotoren, Transformatoren) werden vielfach Kondensatoren eingebaut, die die Phase so verschieben, daß ein günstigerer $\cos \varphi$ erreicht wird (Phasenschieberkondensatoren).

Drehstrom. Durch eine bestimmte Bauweise können in den Generatoren drei Wechselströme erzeugt werden, die gleiche Amplituden und gleiche Frequenz haben. Die drei Ströme unterscheiden sich durch ihre Phasenlage zueinander. Das heißt, der eine Wechselstrom ist gegenüber dem anderen um $2,09$ rad und dieser gegenüber dem dritten um nochmals $2,09$ rad phasenverschoben. Alle drei gegeneinander phasenverschobenen und verketteten Wechselströme bilden ein Drehstromsystem (Bild 7.42). Es gilt für jeden Zeitpunkt:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \text{ bzw. } u_1 + u_2 + u_3 = 0.$$

Die Verbraucher des Drehstromsystems bilden gleichfalls ein System. Es wird angestrebt, daß die Verbraucher das System symmetrisch belasten. Eine unsymmetrische Belastung sucht man zu vermeiden. Generator und Verbraucher eines Drehstromsystems kann man auf zwei verschiedene Arten schalten.

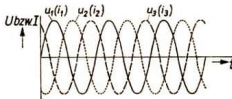


Bild 7.42. U - t - bzw. I - t -Diagramm eines Drehstroms

Dreieckschaltung. Beim Generator werden die drei Wicklungen (Stränge) im Dreieck geschaltet, d. h., der Wicklungsanfang jeder Spule wird mit dem Wicklungsende einer der anderen Spulen verbunden (Bild 7.43.). Von den drei Verbindungspunkten gehen die Leiter R, S und T ab. Die Verbraucher liegen bei Dreieckschaltung zwischen diesen Leitern (bei Motoren liegen die Wicklungen ebenso wie beim Generator). Für die Dreieckschaltung gilt:

$$U = U_{\text{strang}}; I = \sqrt{3} \cdot I_{\text{strang}} \approx 1,73 I_{\text{strang}}.$$

Es gilt:

$$U_{RT} + U_{ST} + U_{RS} = U_1 + U_2 + U_3 = 0$$

$$\text{und } \mathfrak{I}_R + \mathfrak{I}_S + \mathfrak{I}_T = 0.$$

$$\mathfrak{I}_T \text{ ist aber nach Bild 7.43. gleich } \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2.$$

$$\text{Entsprechend folgt: } \mathfrak{I}_R = \mathfrak{I}_3 - \mathfrak{I}_1 \text{ und } \mathfrak{I}_S = \mathfrak{I}_2 - \mathfrak{I}_3.$$

Berechnet man $|\mathfrak{I}_R| = |\mathfrak{I}_S| = |\mathfrak{I}_T| = I_{\text{netz}}$ mit Hilfe des Kosinussatzes, so erhält man mit $|\mathfrak{I}_1| = |\mathfrak{I}_2| = |\mathfrak{I}_3| = I_{\text{strang}}$:

$$I = \sqrt{I_{\text{strang}}^2 + I_{\text{strang}}^2 - 2 I_{\text{strang}}^2 \cos 2,09 \text{ rad}}$$

$$I = I_{\text{strang}} \sqrt{1 + 1 - 2 \left(-\frac{1}{2}\right)} = I_{\text{strang}} \sqrt{3}.$$

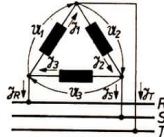


Bild 7.43.
Dreieckschaltung

Sternschaltung. Beim Generator werden die drei Wicklungen im Stern geschaltet, d. h., je ein Wicklungsende der drei Spulen ist an der Bildung des Sternpunktes beteiligt (Bild 7.44.). Die Verbraucher liegen bei dieser Schaltung zwischen einem Strang und dem Sternpunkt (bei Motoren liegen die Wicklungen ebenso wie beim Generator). Für diese Schaltung wird öfter noch eine vierte Leitung verwendet, die die beiden Sternpunkte verbindet (Mittelpunktleiter).

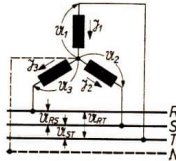


Bild 7.44.
Sternschaltung

Für die Sternschaltung gilt:

$$U = \sqrt{3} U_{\text{strang}} \approx 1,73 U_{\text{strang}}; I = I_{\text{strang}}.$$

Für die Leistung erhält man unabhängig von der Schaltung:

$$P_w = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{strang}} \cdot I_{\text{strang}} \cdot \cos \varphi.$$

7.1.8. Messen elektrischer Größen

Vorbemerkung. Jedes Meßgerät besteht aus dem eigentlichen Meßwerk, in dem die zu messende Größe meist in ein mechanisches Drehmoment umgewandelt wird. Dieses Drehmoment wird dann vielfach mit Hilfe einer Spiralfeder erfaßt über einen Zeiger auf einer Skala angezeigt. Die Feder dient gleichzeitig der Rückstellung, wenn die zu messende Größe nicht mehr wirkt. Die meisten Meßgeräte enthalten dämpfende Einrichtungen, die verhindern, daß die beweglichen Organe des Meß-



werks schlagartig in Bewegung gesetzt werden und der Zeiger dann um das Meßergebnis pendelt. Eine Dämpfung kann durch einen kleinen Kolben in einem vielfach gebogenen Rohr oder durch eine in einem Magnetfeld kreisende kleine Scheibe (Wirbelströme) erreicht werden. Ferner gehören zu einem Meßinstrument Bauelemente, durch die der Meßbereich verändert werden kann.

Für den Gebrauch eines Meßgerätes sind meist einige Angaben auf dem Gerät angegeben.

Durch die Zeichen \perp bzw. \square wird angegeben, ob das Gerät aufrecht bzw. liegend zu gebrauchen ist. Durch $-$, \sim oder \approx wird angegeben, ob das Gerät für Gleich-, Wechsel- oder Drehstrom verwendet werden kann. Die Angabe 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 oder 5,0 kennzeichnet die Genauigkeitsklasse des Meßinstruments und bedeutet, daß der maximal mögliche Meßfehler die angegebene Größe in Prozent des Meßbereichsendwertes betragen kann. Daraus ergibt sich, daß der Fehler um so kleiner ist, je weiter am Skalenende abgelesen wird.

Typen von Meßwerken.

1. Hitzdrahtmeßwerke:

Ein mittels einer Feder gespannter dünner Draht wird vom durchfließenden Strom erwärmt und dehnt sich aus. Die Dehnung wird über ein Hebelsystem auf einen Zeiger übertragen, der die Stärke des durchfließenden Stroms anzeigt. Dieses Meßwerk hat Vorteile, da sowohl Gleich- wie auch Wechselstrom beliebiger Frequenz mit ihm gemessen werden kann. Es ist jedoch außerordentlich empfindlich gegen Überlastung.

2. Drehspulmeßwerke:

Eine Spule ist drehbar im Feld eines Permanentmagneten gelagert (Bild 7.45.). Wird sie von Gleichstrom durchflossen, so tritt ein Drehmoment auf, das auf eine Feder wirkt. Das von der Feder aufgebrachte Gegenmoment ist betragsmäßig gleich groß und wird mittels eines Zeigers angezeigt.

Bei Wechselstrom bleibt der Zeiger wegen seiner zu großen Trägheit stehen, deshalb kann man mit diesem Gerät keine Wechselströme messen.

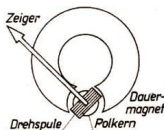


Bild 7.45.
Prinzip eines Drehspul-
meßwerks

3. Elektrodynamische Meßwerke:

Wird der Permanentmagnet eines von einem Wechselstrom durchflossenen Drehspulmeßwerkes durch eine Spule ersetzt, die ebenfalls vom Wechselstrom durchflossen wird, so ändern sich Strom und Magnetfeld im gleichen Rhythmus, es erfolgt also eine Anzeige, so daß der durchfließende Strom gemessen werden kann (Bild 7.46.). Dieses Meßwerk wird meist als Elektrodynamometer bezeichnet. Meßwerke dieser Art nehmen sehr ge-

ringe Leistungen auf (10^{-4} W bis 10^{-1} W). Ihre Meßgenauigkeit ist groß, ihre Herstellung jedoch recht teuer. Bei Elektrodynamometern höherer Genauigkeit werden die Spulen häufig durch einen Eisenmantel abgeschirmt. Oft werden auf einer Achse auch zwei Drehspulen so angebracht, daß sich die Drehmomente des Meßstroms addieren, während sich die Drehmomente von Fremdfeldern gegenseitig aufheben.

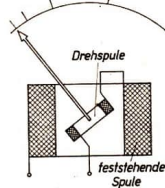


Bild 7.46.
Prinzip eines Elektro-
dynamometers

Sollen sehr kleine Ströme mit Drehspul- oder dynamometrischen Meßwerken gemessen werden, so wird die Drehspule oben und unten an einem gespannten Metallband befestigt. Als Anzeiger dient meist ein kleiner Spiegel, der, von einer Projektionslampe beleuchtet, eine Lichtmarke auf eine Skala wirft. Mit diesen Galvanometern können noch Ströme bis $0,5 \cdot 10^{-10}$ A gemessen werden. Der Meßbereich von Drehspulmeßwerken bzw. Elektrodynamometern kann erweitert werden, indem parallel zu der Spule entsprechende Nebenwiderstände geschaltet werden (Bild 7.47.). Der Eigenbedarf des Meßinstruments steigt dadurch aber erheblich an. Mit Meßgeräten mit eingebauten Nebenwiderständen und einem Gleichrichter können Messungen in weiten Bereichen (einige mA bis 6 A bzw. mV bis 600 V) durchgeführt werden (Vielfachmeßgeräte, z. B. Polyzet).

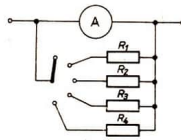


Bild 7.47.
Schaltprinzip für eine
Meßbereichserweiterung
durch Nebenwiderstände

4. Dreheisenmeßwerke:

In einer Spule befinden sich zwei Weicheisenstücke, von denen eins fest an einer Spule befestigt ist. Das andere ist drehbar mit einem Zeiger verbunden. Unter der Wirkung des Magnetfeldes der Spule, das durch den zu messenden Strom erzeugt wird, werden die Eisenstücke magnetisch und stoßen einander ab. Die Abstoßung ist dem Quadrat des magnetischen Flusses proportional. Das entstehende Drehmoment wird wieder vom Gegenmoment einer Spiralfeder kompensiert. Der Eigenbedarf dieses Meßwerks ist recht hoch (1 W bis 5 W), seine Meßgenauigkeit ist geringer als die von Drehspulmeßwerken. Der Meß-



bereich derartiger Geräte kann manchmal dadurch erweitert werden, daß die das Magnetfeld erzeugende Spule ausgewechselt wird (viele Windungen dünnen Drahtes bei hohen Spannungen, wenige Windungen dicken Drahtes bei höheren Strömen).

5. Kreuzspulmeßwerke:

Dieses Meßwerk besteht aus einer in einem Magnetfeld befindlichen Drehspule, auf der zwei um ungefähr 262 mrad versetzte Wicklungen angebracht sind. Wenn durch beide Wicklungen Strom fließt, so addieren sich die entstehenden Magnetfelder zu einem resultierenden Magnetfeld, das Anlaß zur Bewegung der Kreuzspule ist. Die Größe des Zeigerausschlags entspricht dem Verhältnis der durch die Wicklungen fließenden Ströme (Quotientenmeßwerk).

Verwendung der Meßwerke. Die genannten Meßwerke (mit Ausnahme des Kreuzspulmeßwerks) können zur Messung von Stromstärken und Spannungen, das Elektrodynamometer zur Leistungsmessung verwendet werden. Bei der Stromstärkemessung wird das Meßwerk unmittelbar oder mittelbar in den Strompfad geschaltet. Mittelbar kann das Meßwerk über Stromwandler in den Strompfad geschaltet werden. Stromwandler sind Spulen, durch die der Leiter (durch den der Meßstrom fließt) in einer oder in mehreren Windungen hindurchgeführt wird (Transformatorwirkung, Bild 7.48.). Stromwandler werden zur Messung hoher Stromstärken verwendet.

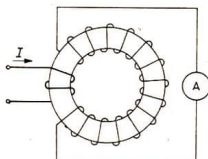


Bild 7.48.
Prinzip eines Stromwandlers

Zur Messung der Stromstärke von Wechselströmen unterschiedlicher Frequenz werden vielfach Thermoumformer verwendet. In einem Glasgefäß befindet sich ein Heizdraht, der von dem zu messenden Strom durchflossen wird. Unmittelbar an dem Heizdraht ist ein kleines Thermoelement befestigt. Dieses besteht aus zwei Drähten verschiedenen Materials, die an der Stelle, die mit dem Heizdraht in Berührung kommt, miteinander verschweißt sind. Wird der Heizdraht durch den Stromdurchgang erwärmt, tritt zwischen den nicht verschweißten Drahtenden eine kleine Thermospannung auf, die der Erwärmung und damit der Stromstärke proportional ist (Bild 7.49.). Die Stromstärkemessung wird also auf eine Spannungsmessung zurückgeführt.

Meistens wird jedoch umgekehrt die Spannungsmessung auf eine Stromstärkemessung zurückgeführt. Zu diesem Zweck treibt die zu messende Spannung einen Strom durch einen genau bekannten Widerstand (Spule des Meßwerkes und gegebenenfalls ein Vorwiderstand), der vom Meßwerk gemessen wird. Der Vorwiderstand ist mitunter

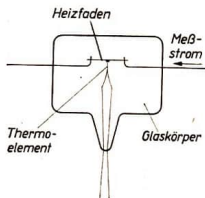


Bild 7.49. Thermoumformer

in das Gehäuse des Spannungsmessers fest eingebaut, oft kann er gegen andere ausgewechselt werden, was zu einer Meßbereichsänderung führt. Ein Spannungsmesser wird nicht in den Strompfad, sondern parallel zu ihm geschaltet. Die Klemmen des Spannungsmessers werden an die Punkte der Schaltung gelegt, zwischen denen die zu messende Ursprungsspannung (Bild 7.50.) bzw. der zu messende Spannungsabfall liegt (Bild 7.51.).

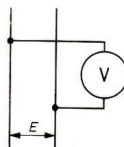


Bild 7.50.
Schaltung eines Spannungsmessers zum Messen einer Ursprungsspannung

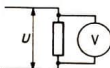


Bild 7.51.
Schaltung eines Spannungsmessers zum Messen eines Spannungsabfalls

Spannungen können aber auch durch spezielle Spannungsmesser gemessen werden, bei denen die Kraft ausgenutzt wird, die zwischen spannungsführenden Teilen auftritt. Zwei Platten bzw. Plattensysteme (Multizellular), von denen eine feststeht, die andere drehbar gelagert ist (Bild 7.52.), sind an die zu messende Spannung angelegt. Die Feldlinien des zwischen ihnen entstehenden elektrischen Feldes haben die Tendenz, sich zu verkürzen. Die dabei auf die Platten wirkende Kraft ist dem Quadrat der angelegten Spannung proportional. Das Meßwerk kann für Gleich- und Wechselspannungen verwendet werden. Dieses Meßwerk ist zur unmittelbaren Strommessung nicht geeignet. Die Leistungsaufnahme ist sehr gering, da praktisch kein Wirkstrom fließt.

In der Hochfrequenztechnik werden zur leistungslosen Spannungsmessung meist spezielle Spannungsmesser mit hohem Eingangswiderstand (Dioden- und Röhrenvoltmeter) verwendet, bei denen mit Hilfe einer Diode oder einer als Audion arbeitenden Triode die Spannung (vgl. Seite 266) gleichgerichtet und gegebenenfalls verstärkt wird.

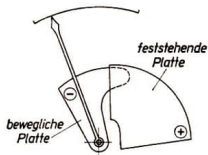


Bild 7.52. Prinzip eines elektrostatischen Spannungsmessers

Bei der Messung sehr hoher Spannungen wird das Meßinstrument über einen Spannungswandler (einen speziellen Transformator) angelegt.

Während der Durchgangswiderstand eines Stromstärkemessers möglichst klein sein muß (geringe Verfälschung des Ergebnisses), soll der Widerstand eines Spannungsmessers möglichst groß sein, damit der durchfließende Strom möglichst klein bleibt.

Ein anderes Verfahren zur genauen Spannungsmessung ist das Kompensationsverfahren, bei dem ein Spannungsnormal mit einer sehr konstanten Spannung U_N und ein Präzisionswiderstand verwendet werden. Die zu messende Spannung U_X wird über einen empfindlichen Strommesser an den als Spannungsteiler geschalteten Widerstand angeschlossen (Bild 7.53.), der von dem Normalelement oder einer Batterie von Normalelementen gespeist wird. Der Abgriff wird so lange verschoben, bis das Meßinstrument keinen Strom mehr anzeigt (es wird also zweckmäßigerweise ein Drehspulinstrument verwendet, dessen Nullpunkt in der Mitte liegt und dessen Ausschlagsrichtung von der Richtung des durchfließenden Stroms bestimmt wird). Dann gilt: $U_N : R = U_X : R_X$. Das Verfahren bietet den Vorteil, daß die zu messende Spannung während der Messung völlig unbelastet bleibt.

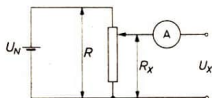


Bild 7.53. Spannungsmessung mittels Kompensation

Die Leistungsmessung bei Gleichstrom wird meist auf eine Stromstärke- und Spannungsmessung zurückgeführt. Die Leistung ergibt sich als Produkt aus der gemessenen Stromstärke und der gemessenen Spannung. Auf gleiche Weise ermittelt man die Scheinleistung eines Wechselstroms. Meist interessiert aber die Wirkleistung. Sie wird mit Hilfe eines Elektrodynamometers ermittelt, dessen feststehende Spule (Feldspule) vom Verbraucherstrom durchflossen wird und dessen Drehspule über entsprechende Vorwiderstände R_V an der Spannung des Verbrauchers liegt (Leistungsmesser; Bild 7.54.). Dann gilt $M_d = k \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$. Diese Leistungsmesser können mit großer Genauigkeit (Klasse 0,1 bis 0,5) gebaut werden.

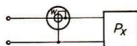


Bild 7.54. Schaltung eines Leistungsmessers

Zur Leistungsmessung im Gebiet der Hochfrequenztechnik dienen oft Spezialgeräte (z. B. Röhrenwattmeter, Thermouniformer) bzw. Spezialschaltungen (Dreivoltmetermethode, Dreiamperemetermethode). Bei Leistungsmessungen an Drehstromsystemen wird bei symmetrischer Belastung nur ein Leistungsmesser verwendet, dessen Anzeige zu verdreifachen ist, bei asymmetrischer Belastung wird im allgemeinen in jedem Zweig je ein Leistungsmesser eingeschaltet. Es gibt jedoch eine spezielle Schaltung, bei der auch bei unsymmetrischer Belastung zwei Leistungsmesser ausreichen (Aronschaltung). Widerstandsmessungen werden häufig auf Spannungs- und Stromstärkemessungen zurückgeführt. Wesentlich einfacher ist die Widerstandsbestimmung mit Hilfe der Wheatstoneschen Brücke (Bild 7.55.).

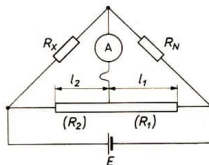


Bild 7.55. Schaltung einer Wheatstoneschen Brücke zur Widerstandsmessung

Der verschiebbare Abgriff wird so eingestellt, daß das Galvanometer keinen Strom anzeigt. Dann gilt: $\frac{R_N}{R_X} = \frac{R_1}{R_2}$.

Verwendet man für $R_1 + R_2$ einen Draht aus Widerstandsmaterial von der Länge $l_1 + l_2$ ($l_1 \triangleq R_1$; $l_2 \triangleq R_2$), so gilt: $R_X = R_N \frac{l_2}{l_1}$.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird lediglich durch die Genauigkeit bestimmt, mit der R_N , l_1 und l_2 gemessen werden können. Die Größe der angelegten Spannung spielt keine Rolle; Fehler durch den Eigenverbrauch des Meßinstruments können nicht auftreten, denn im Moment der Meßwertentnahme führt das Instrument keinen Strom. Solche Brücken werden als handliche Geräte (Meßbrücken) gebaut.

Mit Hilfe eines Kreuzspulmeßwerks kann man einen direkt anzeigenden Widerstandsmesser (Ohmmeter) herstellen (Bild 7.56.).

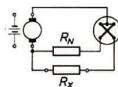


Bild 7.56. Prinzip eines direkt anzeigenden Widerstandsmessers



Es gilt $\frac{I_N}{I_X} = \frac{R_X}{R_N}$ bzw. $R_X = R_N \cdot \frac{I_N}{I_X}$. Da der Quotient $\frac{I_N}{I_X}$ direkt angezeigt wird, ist die Skale durch das häufig $\frac{I_N}{I_X}$ auswechselbare R_N bestimmt.

Leistungsfaktormesser ($\cos \varphi$ -Messer) werden ebenfalls mit Hilfe eines Kreuzspulmeßwerks verwirklicht. Sie sind meist nicht sehr genau, doch werden sie vielfach auf Schalttafeln montiert, damit man einen schnellen Überblick erhält. Im allgemeinen ermittelt man den $\cos \varphi$ als Quotienten $\frac{P_W}{P_S}$, wobei P_S durch Strom-Spannungs-

Messung und P_W durch Messung mit Hilfe eines Leistungsmessers erhalten wurden.

Eine Messung von Frequenzen ist auf verschiedene Weise möglich. Die Netzfrequenz wird mit Hilfe von Zungenfrequenzmessern kontrolliert. Der Strom durchfließt einen Elektromagneten, an dem eine Reihe abgestimmter Stabzungen befestigt ist. Stimmt die Frequenz der angelegten Spannung mit der Eigenfrequenz einer Zunge überein, so gerät diese durch Resonanz in Schwingungen (Bild 7.57.). Die Zunge, die am stärksten schwingt, zeigt dann die Frequenz des Netzes an.

Stabzungen



Bild 7.57.
Zungenfrequenz-
messer

In der Niederfrequenz- und der Hochfrequenztechnik werden Frequenzen oft mit Hilfe von abstimmbaren Schwingkreisen (Reihen- oder Parallelresonanzkreis) gemessen. Der Resonanzfall kann mit Hilfe geeigneter Indikatoren nachgewiesen werden. Aus den Schaltelementen kann dann die Frequenz nach Seite 225 ermittelt werden.

Als sehr vielseitiges Meßinstrument hat sich der Elektronenstrahloszillograph erwiesen. Man kann, nachdem man den Oszillographen entsprechend geeicht hat, z. B. den Maximalwert einer Wechselspannung mit einem Maßstab an der geschriebenen Kurve messen. Auch die Phasenverschiebung kann am Oszillographenschirm nachgemessen werden, wenn man einen Zweistrahloszillographen oder einen elektronischen Schalter und einen Einstrahloszillographen verwendet. Auf gleiche Weise kann man auch Frequenzen messen, indem man das Kurvenbild der unbekannten Frequenz mit dem Bild der Schwingung eines Meßsenders vergleicht. Der Elektronenstrahloszillograph kann für viele andere Messungen mit gutem Erfolg eingesetzt werden (siehe auch [8], [9]).

7.2. Elemente der Leistungselektrik

7.2.1. Erzeugung elektrischer Energie

Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie. Löst man ein Salz, eine Säure oder eine Base in Wasser, so zerfallen

die Moleküle in geladene Atom- bzw. Molekülteile, in Ionen; die Lösung heißt Elektrolyt. Metall- und Wasserstoffionen haben positive Ladungen, alle anderen Ionen sind negativ geladen.

Jede Zuleitung aus Metall oder sonstigen leitenden Stoffen heißt Elektrode. Jede Trennfläche Elektrode-Elektrolyt ist Sitz einer Urspannung, deren Größe vom Elektrolyten bzw. vom Material der Elektrode abhängig ist.

Werden in einen Elektrolyten zwei Elektroden aus verschiedenen Elektrodenstoffen (bei Metallen: eine Elektrode aus möglichst edlem, die andere aus möglichst unedlem Metall, z. B. Kupfer und Zink) gebracht, so entsteht zwischen beiden Elektroden eine resultierende Spannung; das entstehende Gerät heißt galvanisches Element oder kurz Element (Bild 7.58.). Man kann aber auch eine Spannung erzeugen, indem man Elektroden aus gleichem Material, aber verschiedene Elektrolytkonzentrationen, verwendet (Bild 7.59.).

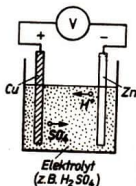


Bild 7.58.
Schematische Darstellung eines
galvanischen Elements

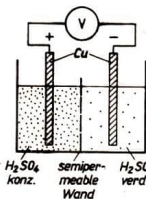


Bild 7.59.
Schematische Darstellung
eines Elements, das auf der
Grundlage unterschiedlicher
Elektrolytkonzentrationen
Spannungen erzeugt

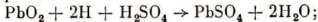
Infolge des Stromdurchgangs gehen Stoffabscheidungen vorstatten, durch die die Oberflächen der Elektroden verändert wer-



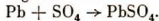
den; dadurch ändern sich die Urspannungen an den Trennflächen im unerwünschten Sinn. Diesen Vorgang bezeichnet man als Polarisation. Man kann sie vermeiden, indem man die gefährdete Elektrode mit einem chemisch aktiven Stoff umgibt, der die Veränderung der Elektrodenoberfläche verhindert, z. B. verwendet man beim Kohle-Zink-Element (Taschenlampenbatterie) dafür Braunstein.

Umkehrbare Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie. Geräte, in denen elektrische Energie in Form chemischer Energie gespeichert werden kann, heißen Sammler oder Akkumulatoren. Am bekanntesten ist der Bleisammler (Bild 7.60.), der hier näher betrachtet werden soll. Bei der Entladung laufen folgende Vorgänge ab (sehr vereinfacht dargestellt):

positive Elektrode:

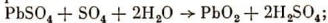


negative Elektrode:



Beim Laden laufen folgende Vorgänge ab (sehr vereinfacht dargestellt):

positive Elektrode:



negative Elektrode:

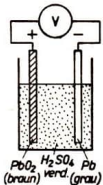


Bild 7.60.
Schematische Darstellung
eines Bleisammlers

Beim Entladevorgang wird also der Elektrolyt verdünnter, und beide Elektroden werden stofflich gleich. Beim Laden erhöht sich die Konzentration des Elektrolyten, und der stoffliche Unterschied zwischen beiden Elektroden wird größer. Die Abhängigkeit der Spannung von der Zeit beim Laden und Entladen ist aus Bild 7.61. abzulesen.

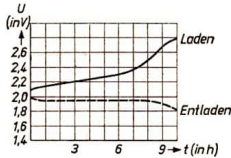


Bild 7.61. Spannung-Zeit-Diagramm beim Laden und Entladen einer Bleisammlerzelle

Die Speicherfähigkeit des Sammlers wird durch die in ihm speicherbare Elektrizitätsmenge Q (in Ah) charakterisiert. Kleinere Sammler haben eine „Kapazität“ von ungefähr 250 mAh, große „Batterien“ haben Speicherfähigkeiten von über 1000 Ah. Wesentlich robuster als Bleisammler sind alkalische Sammler, die z. B. als Elektroden Kadmium- und Nickelhydroxid, als Elektrolyt Kalilauge verwenden.

Weitere Spannungsquellen. Neuerdings werden Elemente projektiert und versuchsweise gebaut, in denen auf direktem Wege Kernenergie in elektrische Energie umgeformt wird. Auch Thermoelemente werden versuchsweise zur Gewinnung von Spannungen verwendet.

Wesentlich weiter ist man bei der Entwicklung sogenannter Solarzellen, die sich unter anderem als Energiequellen für Raumfahrkörper ausgezeichnet bewährt haben. In ihnen wird die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umgeformt.

Die bisher genannten Spannungsquellen sind mit wenigen Ausnahmen (Bleisammler als Spannungsquellen für Motoren, z. B. in Grubenlokomotiven, U-Booten u. a.) nur für die Schwachstromtechnik von Bedeutung. Als Energiequellen für den Energiebedarf der Menschheit sind sie bisher ohne Bedeutung geblieben, obwohl in neuerer Zeit beachtenswerte Projekte mit Solarzellen, Kernelementen u. a. diskutiert und experimentell erprobt werden. Die großen Mengen elektrischer Energie werden bisher aus mechanischer Energie durch Induktion erzeugt.

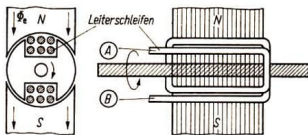


Bild 7.62. Zur technischen Realisierung des Induktionsprinzips

Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie durch Induktion. Die elektrischen Anlagen, in denen das Induktionsgesetz technisch genutzt wird, heißen Generatoren. Das dynamo-elektrische Prinzip (Induktionsprinzip in der Richtung Bewegungsenergie \rightarrow elektrische Energie) wird schematisch in Bild 7.62. dargestellt: In einem Magnetfeld (Erregerfeld) mit dem Erregerfluß Φ_e rotiert ein Spulensystem, das aus einzelnen Leiterschleifen besteht (Anfang der Spule A, Ende der Spule B). Das Spulensystem ist aus Gründen der besseren Ausnutzung von Φ_e in ein Blechpaket, das Läuferblechpaket, eingelegt. Der von einer Schleife umfaßte Fluß ändert sich ständig, also wird in ihr eine Spannung induziert, die während einer Voldrehung zweimal ihre Richtung ändert. Wird die Spannung über Schleifringe (Bild 7.63.) abgenommen, so ändert sich die Spannung nahezu nach einer Sinusfunktion. Wird als Spannungsabnehmer ein Zylinder aus Isoliermaterial verwendet, auf dem voneinander isoliert zwei halbe Hohlzylinder aus gut leitendem Material befestigt sind, an die jeweils ein Schleifenende angelötet ist (Kommutator, Stromwender),

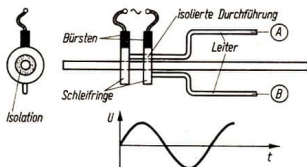


Bild 7.63. Abnahme einer Wechselspannung über Schleifringe

so wird eine pulsierende Gleichspannung abgenommen, denn immer, wenn sich die Richtung der induzierten Spannung umkehrt, wird an die abnehmenden Kontakte (Bürsten), die auf dem Kommutator schleifen, das andere Kommutatorsegment gelegt (Bild 7.64.).

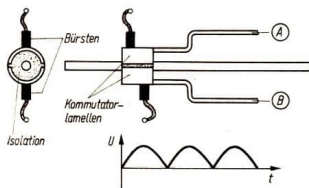


Bild 7.64. Abnahme einer pulsierenden Gleichspannung über einen Kommutator

Bei Generatoren, bei denen die Spannung im Läufer induziert wird, entscheidet der Stromabnehmer die Art der Spannung, die vom Generator abgegeben wird.

Für die von einem Generator induzierte Spannung E gilt nach dem Induktionsgesetz:

$$E = c \cdot \Phi_e \cdot n$$

mit n als Drehzahl.

Der Fluß Φ_e wird nur bei sehr kleinen Generatoren durch Permanentmagnete, bei allen größeren Maschinen durch Elektromagnete erzeugt.

Den Gleichstrom für die Erzeugung des Flusses kann man einer besonderen Quelle entnehmen. Einen solchen Generator nennt man fremderregt. Viele große Generatoren erhalten ihren Erregerstrom von einer kleinen Gleichstrommaschine, die meist auf der Welle des großen Generators sitzt. Derartige Generatoren nennt man eigenerrert.

Andere Generatoren, man nennt sie selbsterrert, erzeugen ihren Erregerstrom selbst. Wird nämlich eine Maschine durch eine äußere Stromquelle aufmagnetisiert, so bleibt auch nach dem Abschalten der äußeren Stromquelle ein wenig Magnetismus im Eisen der Maschine (remanenter Fluß).



Die von diesem remanenten Fluß induzierte Spannung nutzt man zur weiteren Erregung aus. Die erzeugte Spannung *schau-kelt* sich dabei bis auf ihren Nennwert auf. Dieses Prinzip der Selbsterregung wurde von *Werner von Siemens* entdeckt und technisch genutzt.

Die Erregerwicklung eines Generators kann sich im Stator (stehender Teil des Generators, besteht aus dem Ständerblechpaket, das die Pole bildet, und der Ständerwicklung in einem Gehäuse) oder im Rotor (rotierenden Teil des Generators, besteht aus der Läuferwicklung und dem Läuferblechpaket, das auf der Welle befestigt ist, bzw. aus einem massiven Rotor mit entsprechender Wicklung) befinden. Den Teil eines Generators, in dem die Spannung induziert wird, nennt man meist Anker.

Gleichstromgeneratoren. Je nach der Art, wie die den Erregerfluß erzeugenden Wicklungen in den Stromkreis des Generators geschaltet sind, unterscheidet man bei selbst-erregten Gleichstromgeneratoren Nebenschluß-, Doppelschluß- und Gegen-verbundgeneratoren. Diese Gleichstromgeneratoren zeigen bei Leerlauf gleiches Betriebsverhalten. Nach $E = c \cdot \Phi_e \cdot n$ ist die induzierte Spannung vom Fluß Φ_e und der Drehzahl n abhängig. n werde als konstant angesehen, da es einzig durch die Antriebsmaschine bestimmt wird. Der Fluß Φ_e wird durch den Erregerstrom I_e erzeugt. Da der Zusammenhang zwischen dem Erregerstrom I_e und dem von ihm erzeugten Fluß Φ_e graphisch durch die Hysteresis-kurve gegeben ist, gilt eine entsprechende Kurve (Bild 7.65.) für das Leerlaufverhalten aller Gleichstromgeneratoren. Beim Leerlauf ist die Klemmenspannung gleich der induzierten Spannung.

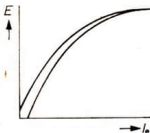


Bild 7.65.
 E - I_e -Diagramm
eines leer laufenden
Gleichstromgenerators

Bei Belastung zeigen die verschiedenen Generatortypen jedoch unterschiedliches Betriebsverhalten.

Nebenschlußgenerator und fremderregter Generator:

Arbeitet der Generator (Bild 7.66.) auf einen Verbraucher, so fließt der Belastungsstrom durch den Anker. Über dem Widerstand des Ankers tritt ein Spannungsabfall der Größe $I \cdot R_a$ auf, um den die Klemmenspannung vermindert wird. Mit zunehmendem Strom wächst dieser Spannungsabfall. Der vom Belastungsstrom I durchflossene Anker erzeugt einen Fluß, durch den das Erregerfeld verzerrt wird (Ankerrückwirkung).

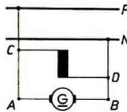


Bild 7.66.
Schaltplan eines Gleich-
strom-Nebenschlußgene-
rators

Dadurch fällt die Spannung mit zunehmendem Strom I stärker ab, als der Spannungsabfall über R_a erwarten läßt. Bei Nebenschlußgeneratoren wird auch die Spannung über den Erregerwicklungen durch den Spannungsabfall über R_a vermindert, so daß mit dem Erregerstrom I_e auch der Erregerfluß Φ_e absinkt. Bei Überschreiten eines maximalen Stroms sinkt die Spannung auf Null ab, und es stellt sich der Kurzschlußstrom I_k ein (Bild 7.67.).

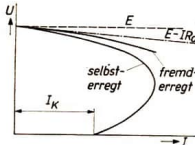


Bild 7.67.
 U - I -Diagramm
eines fremderregten
Gleichstromgenera-
tors und eines
Gleichstrom-Neben-
schlußgenerators

Die Ankerrückwirkung verursacht weiter, daß die Stromwendung nicht in der neutralen Zone (das ist die Stellung des Ankers, bei der keine Spannung induziert wird) erfolgt. Das hat zur Folge, daß an den Bürsten



Funken auftreten, die Bürsten *feuern*. Dabei werden die Kommutatorsegmente stark angegriffen und nach einiger Zeit unbrauchbar. Um diese Rückwirkung des Ankers zu vermeiden, bringt man in den Erregerpolen neben der Erregerwicklung eine weitere Wicklung an, die vom Ankerstrom durchflossen wird und so geschaltet ist, daß das durch sie erzeugte Feld die Feldverzerrung durch Ankerrückwirkung kompensiert (Kompensationswicklung). Ordnet man außer den Erregerpolen sogenannte Wendepole an, die vom Ankerstrom erregt werden, so wird das Bürstenfeuer vermieden.

Im Betrieb fordert man jedoch von einem Generator konstante Klemmenspannung. Sie kann man durch eine geeignete Stellung des Erregerflusses erhalten. Die Stellung kann von Hand oder durch spezielle Reguliereinrichtungen erfolgen.

Doppelschlußgenerator:

Dieser Generator (Bild 7.68.) stimmt im wesentlichen mit dem Nebenschlußgenerator überein. Jedoch befindet sich außer der Nebenschlußerregerwicklung eine weitere Wicklung, die vom Belastungsstrom I durchflossen wird (Reihenschlußwicklung). Der von der Reihenschlußwicklung erzeugte Fluß steigt mit zunehmendem Belastungsstrom und verstärkt den von der Nebenschlußwicklung hervorgerufenen Hauptfluß. Trotz veränderlicher Belastung bleibt die Klemmenspannung dieses Generators bei entsprechender Konstruktion nahezu konstant.

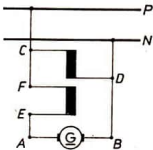


Bild 7.68.
Schaltplan eines Gleichstrom-Doppelschlußgenerators

Einen Generator, dessen Erregerwicklung nur vom Ankerstrom durchflossen wird, bezeichnet man als Hauptschlußgenerator. Er hat kaum praktische Bedeutung.

Gegenverbundgenerator:

Ganz gleichartig ist der Gegenverbundgenerator aufgebaut, jedoch ist die Reihenschlußwicklung so geschaltet, daß der von ihr erzeugte Fluß den Hauptfluß schwächt. Man erreicht dadurch, daß bei steigendem Strom die Spannung absinkt (Bild 7.69.). Derartige Generatoren werden als Schweißgeneratoren verwendet.

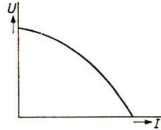


Bild 7.69.
U-I-Diagramm eines Gleichstrom-Gegenverbundgenerators

Wechselstromgeneratoren. Wechselstrom wird im allgemeinen von sogenannten Synchrongeneratoren erzeugt. Das sind Maschinen, die auf ein Netz mit konstanter Frequenz arbeiten und durch eine Antriebsmaschine mit konstanter Drehzahl angetrieben werden. Frequenz in s^{-1} , Drehzahl n in min^{-1} und Polpaarzahl p (der Erregerwicklung) sind durch folgende Gleichung gekoppelt:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

Das bedeutet, daß bei vorgegebener Frequenz des Netzes, auf das der Generator arbeiten soll, Drehzahl und Polpaarzahl aufeinander abgestimmt werden müssen. Die Arbeitsweise eines Synchrongenerators ist aus Bild 7.70. erkennbar. In drei um

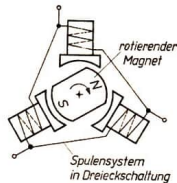


Bild 7.70.
Prinzip eines Drehstrom-Synchrongenerators

209 rad versetzten Wicklungen werden durch das umlaufende Magnetfeld drei um



je 209 rad gegeneinander phasenverschobene Spannungen induziert.

Der Erregerstrom wird meistens von kleinen Gleichstromnebenschlußmaschinen erzeugt (Eigenerregung). Bei Wechselstromgeneratoren ist im allgemeinen der Ständer der Anker, da die Abnahme des erzeugten Stroms über Schleifringe problematisch ist.

In der Ausführung der Generatoren unterscheidet man zwischen den meist langsamer laufenden Schenkelpolmaschinen (bis 1500 min^{-1}) und den schnellaufenden Turbogeneratoren (3000 min^{-1}). Die Schenkelpolmaschinen haben ihren Namen von den ausgeprägten Polen (mit der Erregerwicklung), die auf dem Polrad befestigt sind. Turbogeneratoren (ihren Namen haben sie daher, daß sie meistens mit einer Dampf- oder Gasturbine gekoppelt sind) besitzen einen massiven Läufer aus Stahl (Vollpol-läufer), auf dessen Umfang Nuten einge-
fräst sind, in die die Erregerwicklungen eingelegt werden.

Maschinen dieser Bauform sind bei hohen Drehzahlen wegen der auftretenden Fliehkräfte besser geeignet als Maschinen mit ausgeprägten Polen.

Im Leerlaufverhalten unterscheiden sich die Synchrongeneratoren kaum von den Gleichstrommaschinen. Bei Belastung muß aber zwischen der Art der Belastung unterschieden werden. Geschieht die Belastung durch einen Ohmschen Widerstand, so zeigt der Generator Nebenschlußverhalten. Bei induktiver Belastung sinkt die Klemmenspannung stärker, bei kapazitiver Belastung weniger ab (Bild 7.71.). Mit Hilfe von Regleinrichtungen erreicht man, daß je nach der Art der Belastung der Erregerstrom so beeinflußt wird, daß die Klemmenspannung konstant bleibt (Bild 7.72.).

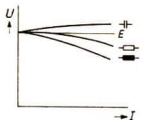


Bild 7.71.
U-I-Diagramm eines
Synchrongenerators
bei Belastung

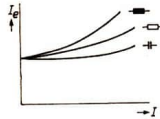


Bild 7.72.
 I_e -I-Diagramm
eines Synchrongenerators
mit konstanter Klemmen-
spannung bei Belastung

Zur Speisung besonderer Wechselstromnetze (z. B. Bahnnetz mit $f = 16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$) werden Einphasen-Wechselstromgeneratoren eingesetzt, die im Prinzip ebenso wie eine Synchronmaschine aufgebaut sind. Der Unterschied besteht aber darin, daß in nur einer Wicklung eine Spannung induziert wird.

Bei Wechselstromgeneratoren tritt ebenfalls eine Ankerrückwirkung auf. Darüber hinaus wird der Blindwiderstand der Wicklung wirksam. Genauere Untersuchungen, die hier nicht durchgeführt werden sollen, werden günstig mit Hilfe von Zeigerdiagrammen vorgenommen.

Soll eine Synchronmaschine an das Netz zugeschaltet werden, so müssen Spannung, Phase und Frequenz mit der des Netzes abgestimmt (synchronisiert) werden. Nur wenn in allen drei Größen Übereinstimmung besteht, kann zugeschaltet werden (vgl. Seite 251).

7.2.2. Fortleitung elektrischer Energie

Die von den Generatoren erzeugte Energie muß zu den Verbrauchern geleitet werden. Außer den eigentlichen Leitungen gehören zum Fortleitungs- und Verteilungssystem Umformungsanlagen, Umspanner, Schalter, Sicherungseinrichtungen usw.

Historisch gesehen wurde zunächst nur Gleichstrom erzeugt. Dieser wurde überwiegend durch Kabel zum Verbraucher geleitet. Dann trat der Wechselstrom (Drehstrom) an seine Stelle. Er hat gegenüber dem Gleichstrom Vorteile:

Mittels Transformatoren kann man ohne zu große Verluste jede beliebige Spannung erhalten. Das ist besonders für die wirtschaftliche Fortleitung wichtig, da bei



hohen Spannungen, aber niedrigeren Strömen die Querschnitte der Leitungen nicht, so groß zu sein brauchen.

Bei sehr hohen Spannungen treten aber bei Drehstrom hohe Verluste durch Entladungsvorgänge (Koronaerscheinungen) auf, so daß Drehstromleitungen von 400 kV an unrentabel werden. Einphasenstromsysteme übertragen nur pulsierende Leistung. Sie sind wegen des hohen Bedarfs an Leitermaterial unrentabel, deshalb werden sie nur für Spezialzwecke, z. B. für den Bahnbetrieb, verwendet. Darum setzt sich bei hohen Spannungen wieder Gleichstrom durch, der besonders vorteilhaft durch relativ einfach gebaute Kabel fortgeleitet wird. Um diesen Gleichstrom umspannen zu können, gehören zu einer modernen Gleichstromanlage Gleich- und Wechselrichter.

Transformatoren. Einrichtungen, mit deren Hilfe Spannungen nahezu verlustlos verändert werden können, heißen Transformatoren oder Umspanner. Umspanner arbeiten nach folgendem Prinzip: Um einen im allgemeinen geschlossenen magnetischen Kreis, der aus speziellen voneinander isolierten Blechen zusammengesetzt ist, werden zwei Wicklungen entsprechenden Querschnitts gelegt.

Legt man eine Wicklung (Primärwicklung) an eine Wechselspannung, so entsteht ein magnetisches Wechselfeld, das in der zweiten Wicklung (Sekundärwicklung) wieder eine Wechselspannung induziert. Das Verhältnis der Windungszahlen ist für das Übersetzungsverhältnis der Spannungen bestimmend. Unter Vernachlässigung aller Verluste (Kupferverluste, Wirbelstromverluste, Streuverluste u. a.) gilt für das Übersetzungsverhältnis:

$$U_p : U_s = N_p : N_s.$$

Die wirklich auftretenden Verluste können klar erfaßt werden. Eine gute Hilfe dazu sind das Zeigerdiagramm und das Ersatzschaltbild (in ihm werden alle Teile, die für Verluste verantwortlich sind, durch Ersatzwiderstände, Ersatzinduktivitäten bzw. Er-

satzkapazitäten wiedergegeben. Die höhere der beiden Spannungen (Primär- und Sekundärspannung) wird vielfach als Überspannung, die niedrigere als Unterspannung bezeichnet.

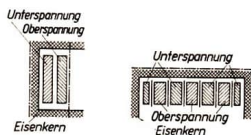


Bild 7.73. Röhren- und Scheibenwicklung

Bei den meisten Transformatoren werden Primär- und Sekundärwicklung ineinander (Röhrenwicklung) oder scheibenartig nebeneinander (Scheibenwicklung) ausgeführt (Bild 7.73.). Die einzelnen Windungen müssen gut voneinander isoliert werden (bei kleineren Spannungen genügt Lackisolation, bei höheren Spannungen werden die stabförmigen Leiter mit speziellen Isolierstoffen umwickelt). Bei Drehstromtransformatoren befinden sich die Wicklungen auf entsprechend geformten Kernen (Bild 7.74.). Die einzelnen Wicklungen können auf verschiedene Weise zusammengeschaltet werden. Welche Schaltung man wählt, hängt vom Übersetzungsverhältnis und von der erwarteten Belastung, besonders der des Nulleiters, ab.



Bild 7.74.
Kernformen bei Drehstromtransformatoren

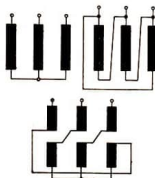


Bild 7.75
Schaltungsarten für Drehstromtransformatoren: Stern-, Dreieck-, Zickzackschaltung



Neben den bekannten Schaltungsarten Stern und Dreieck gibt es noch die sogenannte Zickzackschaltung (Bild 7.75.).

Das ständige Ummagnetisieren der Weisschen Bezirke in den Trafoblechen führt zu einer Erwärmung des Transformators, die durch eine Erwärmung der Wicklungen bei Belastung verstärkt wird. Größere Transformatoren müssen deshalb gekühlt werden. Die Kühlung kann unmittelbar durch Luft erfolgen (Trockenumspanner) oder dadurch, daß sich der Transformator in einem Kessel mit einem Spezialöl (Transformatorenöl) befindet; es muß bestimmte Eigenschaften haben, z.B. wasserfrei sein. (Durch das Öl wird gleichfalls eine gute Isolation erreicht.) Dieses Öl kann dann durch Luft oder durch Wasser gekühlt werden (Ölumspanner).

Für ein Übersetzungsverhältnis von maximal 1:2 (bei Hochspannungstransformatoren nur 1:1,25) werden öfter sogenannte Spartransformatoren verwendet, die nur eine Wicklung enthalten, die jedoch angezapft ist (Bild 7.76.). Primär- und Sekundärkreis sind also galvanisch verkoppelt.

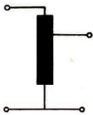


Bild 7.76.
Schaltung eines Spar-
transformators

Neben den üblichen Umspannern gibt es noch eine Reihe von Transformatoren für spezielle Zwecke. Hier sollen einige nur kurz erwähnt werden:

Schweißtransformator:

Widerstandsschweißung:

$$U = 1 \text{ bis } 3 \text{ V}, I \leq 50 \text{ kA};$$

Lichtbogenschweißung:

$$U = 25 \text{ bis } 30 \text{ V}, I \leq 50 \text{ bis } 700 \text{ kA}$$

Der magnetische Kreis ist meist nicht geschlossen, sondern enthält oft einen veränderlichen Luftspalt.

Prüfumspanner: Mit ihrer Hilfe können Spannungen bis zu 3000 kV erzeugt werden.

Drehumspanner: Aufbau wie ein Schleif-

ringläufermotor (S. 253), durch Drehen des *Läufers* mit der Primärwicklung kann die Sekundärspannung eingestellt werden.

Regeltransformatoren: Durch Umschalter oder verschiebbare Kontakte kann das Übersetzungsverhältnis verändert werden.

Umformer. Umformer dienen dazu, über mechanische Energie als Zwischenstufe eine Stromart in eine andere umzuformen. (Dabei kann beispielsweise auch ein Wechselstrom niedriger Frequenz in einen von höherer Frequenz umgeformt werden.) Sehr häufig werden Motor-Generatoren verwendet. Sie bestehen aus einem Motor (gegebene Stromart, meist Drehstrom), der einen entsprechenden Generator (gewünschte Stromart, meist Gleichstrom) antreibt.

Aus dem Motor-Generator hervorgegangen ist der Einankerumformer, der hauptsächlich aus einem Gleichstromanker besteht, dem auf einer Seite über Schleifringe der Drehstrom zugeführt und auf der anderen Seite über einen Kommutator der Gleichstrom abgenommen wird. Meist wird der Generator durch den erhaltenen Gleichstrom erregt. Die genannten Umformer werden in der Industrie für verschiedene Zwecke verwendet.

Kontaktumformer:

Für niedrigere Spannungen werden Kontaktumformer mit gutem Erfolg eingesetzt. Ihr Wirkungsprinzip besteht darin, daß auf mechanischem Wege (schwingende Kontakte) die positive Halbwelle eines Wechselstroms dem positiven Leiter, die negative Halbwelle dem negativen Leiter zugeführt wird.

Gleichrichter. Gleichrichter arbeiten im Prinzip als Ventile, die die positive Halbwelle durchlassen, jedoch für die negative Halbwelle gesperrt sind. Die Gleichrichtung erfolgt durch

1. Eigenschaften von Halbleitern oder
2. Bewegung freier Elektronen bzw. Ionen.

Halbleitergleichrichter:

Halbleiter (Selen, Germanium, Silizium) und bestimmte Verbindungen (z. B. Kup-



feroxidul) haben die Eigenschaft, dem Strom in einer Richtung einen geringen, in der umgekehrten Richtung jedoch einen großen Widerstand entgegenzusetzen (Bild 7.77.), siehe auch Seite 268.

Nach ihrer Bauweise unterscheidet man zwischen Flächen- und Spitzengleichrichtern (Halbleiterdioden). Die Spitzengleichrichter spielen überwiegend in der Hochfrequenztechnik eine Rolle.

Ein Halbleiterelement (Bild 7.78.) selbst trägt nur eine geringe Spannung. Deshalb setzt man solche Elemente zu Säulen zusammen, die man dann zu verschiedenen Schaltungen zusammenfügt. Durch die Einphasen-Einweg-Schaltung (Bild 7.79.) erhält man einen pulsierenden, periodisch unterbrochenen Gleichstrom. Durch eine Einphasen-Brücken-Schaltung (Graetz-Schaltung) wird ein pulsierender, aber ununterbrochener Strom erreicht (Bild 7.80.). Einen nur wenig pulsierenden Strom erhält man durch eine Dreiphasen-Brücken-Schaltung (Bild 7.81.).

Derartige Schaltungen werden vielseitig angewendet: zur Batterieladung, zur Speisung von Elektromagneten, elektrolytischen Bädern, Bogenlampen, Gleichstromanlagen in der drahtgebundenen und drahtlosen Fernmeldetechnik, in der Meßtechnik, für den

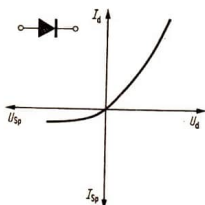


Bild 7.77. U - I -Diagramm und Schaltzeichen eines Halbleitergleichrichters



Bild 7.78. Schematische Darstellung eines Ge-Flächengleichrichters

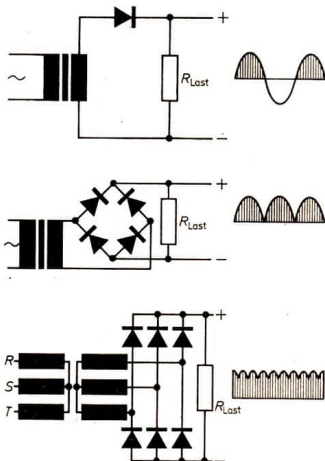


Bild 7.79. Einphasen-Einweg-Schaltung

Bild 7.80. Einphasen-Brücken-Schaltung (Graetz-Schaltung)

Bild 7.81. Dreiphasen-Brücken-Schaltung

Einbau in Fahrzeuge aller Art wegen der hohen mechanischen Festigkeit.

Gleichrichtung durch Elektronen- bzw. Ionenemission:

Wird eine der beiden Elektroden in einem evakuierten Entladungsgefäß zum Glühen gebracht, so werden von dieser Elektrode Elektronen emittiert. Hat die andere Elektrode gegenüber der glühenden Elektrode (Katode) ein positives Potential, so fließt ein Elektronenstrom zur kalten Elektrode (Anode). Liegt an der Anode gegenüber der Katode ein negatives Potential, so werden die Elektronen von den Anoden abgestoßen, der Stromfluß im Entladungsgefäß und damit auch in dem Kreis, in den das Gefäß geschaltet ist, wird unterbrochen.

Auf dieser Grundlage arbeiten die Hochvakuum-Glühkatoden-Röhren (Dioden, Dop-



peldioden), die Glühkatoden-Gleichrichter, die Quecksilberdampf-Gleichrichter und die Quecksilberdampf-Stromrichter (Bild 7.82.).

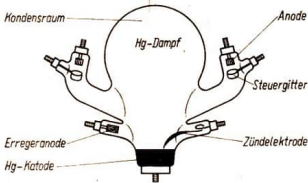


Bild 7.82. Quecksilberdampf-Stromrichter in Glasausführung (vereinfacht)

Die Glühkatoden-Gleichrichter enthalten außer der Glühkatode eine Anode und eine Gasfüllung bzw. Quecksilber im Röhrenfuß. Die Gefäße werden meist in Brückenschaltung verwendet.

Quecksilberdampf-Gleichrichter :

Als Katode dient flüssiges Quecksilber, auf dem z. B. mit Hilfe einer magnetisch bewegten Zündanode ein weißglühender Katodenfleck erzeugt und durch eine Erregeranode aufrechterhalten wird. Dieser Katodenfleck emittiert die Elektronen. Außer der Zündanode und der Erregeranode enthält der Quecksilberdampf-Gleichrichter eine, zwei, drei oder sechs Anoden.

Bei einphasigem Wechselstrom wird mit Hilfe eines zweianodigen Gleichrichters ein pulsierender Gleichstrom erzeugt (Bild 7.83.). Mittels eines Gleichrichters mit drei Anoden kann Drehstrom zu einem Gleichstrom gerichtet werden (Bild 7.84.). Verwendet man eine sechsanodige Ausführung, so ist der Gleichstrom wesentlich weniger wellig (Bild 7.85.).

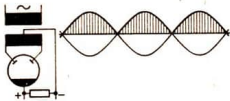


Bild 7.83. Doppelweggleichrichtung mittels Quecksilberdampf-Gleichrichters

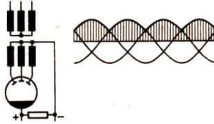


Bild 7.84. Gleichrichtung von Drehstrom mittels dreianodigen Quecksilberdampf-Gleichrichters

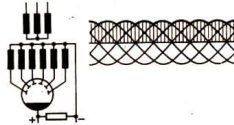


Bild 7.85. Gleichrichtung von Drehstrom mittels sechsanodigen Quecksilberdampf-Gleichrichters

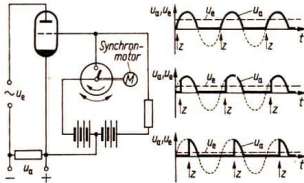


Bild 7.86. Schematische Darstellung der mechanischen Gittersteuerung eines Gasentladungsventils

Für Gleichrichteranlagen mit Quecksilberdampf-Gleichrichtern werden noch eine Reihe andere Schaltungen verwendet sowie Zusatzeinrichtungen benötigt (z. B. Erregungseinrichtung, damit der Lichtbogen während des Betriebes nicht abreißen kann, Schalter, Sicherungen u. a.).

Die Gleichrichtergefäße sind entweder aus Glas oder aus Eisenblechen hergestellt. Glasgefäße werden durch Luft, Eisengefäße auch durch Wasser gekühlt.

Quecksilberdampf-Stromrichter:

Quecksilberdampf-Stromrichter sind wie Quecksilberdampf-Gleichrichter aufgebaut. Jedoch befindet sich in der Nähe jeder Anode ein Gitter, das über einen Spannungs-



teiler an einer Gleichspannung liegt. Ist die Spannung am Gitter einer Anode negativ, so bildet sich kein Lichtbogen zwischen der Katode und der entsprechenden Anode aus. Mit Hilfe dieser Stromrichter kann man Ein- und Mehrphasenstrom in Gleichstrom mit regelbarer Spannung (Gleichrichtung), Gleichstrom in Ein- oder Mehrphasenstrom (Wechselrichtung) oder Wechselstrom von einer Frequenz in einen Wechselstrom anderer Frequenz mit und ohne Änderung der Anzahl der Phasen und der Spannung umformen (Umrichtung).

Die Gitter und damit der Zeitpunkt des Zündens der Katoden-Anoden-Strecke können nach verschiedenen Verfahren gesteuert werden (Bild 7.86.).

Schalt- und Sicherungsgeräte. Die in der Starkstromtechnik verwendeten Schalter lassen sich (vereinfacht) folgendermaßen einteilen:

1. Leistungsschalter,
2. Trennschalter,
3. Überstromschalter,
4. Sonderschalter.

Leistungsschalter gestatten das Aus- bzw. Einschalten unter Vollast. In der Niederspannungstechnik sind es vielfach Hebel-schalter, bei denen messerförmige Schaltstücke in federnde Kontakte gedrückt werden. Bei niedrigen Stromstärken, bei deren Schaltung kein Lichtbogen auftritt, werden meistens Dreh- oder Kippschalter mit Sprungschaltung verwendet. In ihnen wird mit Hilfe einer Feder sprunghaft geschaltet. Walzenschalter, Paketschalter und Nockenschalter sind Schalter, mit deren Hilfe einfache Steuerungen verwirklicht werden (z. B. Stern-Dreieck-Schalter). Druckknopf- und Schwenktaster werden für Hilfs- und Steuerstromkreise (z. B. für das Einschalten von Schützen, für Signalgabe, für das Fernauslösen von Schaltern usw.) verwendet.

Schnellschalter bzw. Schütze sind ein- bzw. mehrpolige Schalter, die durch Magnete eingeschaltet und in Betriebsstellung gehalten werden (Bild 7.87.). Das Ausschalt-

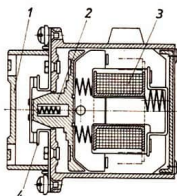


Bild 7.87.
Schnitt durch einen
Schalterschütz (1 Licht-
bogenkammer, 2 Schalt-
stück-Träger, 3 Magnet-
spule, 4 Schaltstücke)

ten erfolgt meist durch Federkraft, wenn die Erregung der Magneten fortfällt. Für den Lichtbogen, der beim Ausschalten größerer Ströme auftritt, ist bei den Schützen eine besondere Kammer vorgesehen (Löschkammer), in der der Lichtbogen (ohne Schaden anzurichten) gelöscht wird. Die Löschung erfolgt bei einigen Bauarten dadurch, daß der Lichtbogen magnetisch *ausgeblasen* wird. Das geschieht dadurch, daß die die Lichtbogenentladung verursachenden Ionen durch das Magnetfeld in die Löschkammer gedrückt und dort gekühlt werden. Die heißen und ionisierten Gase werden durch Ausblaseöffnungen ausgestoßen.

Bei anderen Bauarten befinden sich die Schaltstücke in einem Gefäß mit Öl.

In der Hochspannungstechnik genügen die genannten Schalter nicht mehr, um die unter voller Last stehenden Leitungen zu schalten. Die hohen Spannungen und Ströme verursachen in der Regel Lichtbögen, die meist zur Zerstörung eines Niederspannungsschalters führen würden. In den Hochspannungsleistungsschaltern wird der beim Trennen der Kontakte auftretende Lichtbogen durch besondere Verfahren gelöscht. Die Löschung des Lichtbogens und die Kühlung der Schaltstücke erfolgt in speziellen Löschkammern durch Öl (Ölschalter, Bild 7.88.), durch Druckluft oder Stickstoff (Druckgasschalter), durch Gase, die durch den Lichtbogen aus speziellen organischen Isolierstoffen freigesetzt werden (Hartgasschalter), durch die Expansion der beim Löschen des Lichtbogens mit Flüssigkeiten

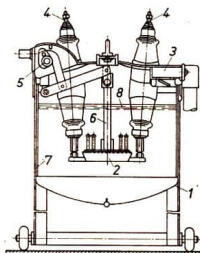


Bild 7.88.
Schnitt durch einen
Ölschalter (1 Kessel,
2 Schaltbrücke,
3 Ausblasseöffnung,
4 Anschlüsse,
5 Schaltwelle, 6 Iso-
lierstab, 7 isolierende
Auskleidung).

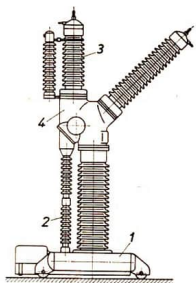


Bild 7.89.
Ansicht eines Ex-
pansionsschalters
(1 Fahrgestell als
Druckluftbehälter,
2 Schaltwelle, 3 Lei-
stungskammer, 4 Ge-
triebekammer)

geringer Leitfähigkeit auftretenden Dämpfe (Expansionsschalter, Bild 7.89.).

Kennzeichnend für den Schalter und bestimmend für seine Verwendung sind seine Nennleistung (Spitzenlast des zu schaltenden Stroms) und seine Abschaltleistung (Höhe des größtmöglichen Kurzschlußstroms).

Der Antrieb der Leistungsschalter erfolgt nur bei kleinen Leistungen von Hand; bei allen anderen durch Druckluft, Elektromotoren oder auf elektromagnetischem Wege.

Trennschalter oder Trenner werden im allgemeinen nur in Hochspannungsanlagen verwendet (Bild 7.90.). Sie dürfen nie (abgesehen von den sogenannten Leistungstrennern, einer Verbindung von Leistungs-

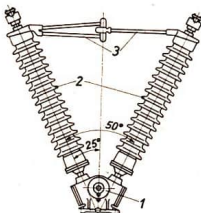


Bild 7.90.
Ansicht eines Dreh-
trenners (1 Druck-
luftantrieb, 2 Dreh-
stützer, 3 Trenn-
arme)

schalter und Trenner, und Lasttrennern, mit deren Hilfe nur Leerlaufströme von wenigen MVA ausgeschaltet werden dürfen) unter Last geschaltet werden. Trenner müssen den Stromkreis zuverlässig erkennbar und mit genügendem Isoliervermögen auftrennen. Sie werden nur willkürlich geschaltet.

Überstrom(aus)schalter gibt es in Nieder- und Hochspannungsnetzen. Sie haben den Zweck, die Anlage vor zu hohen Strömen, meist Kurzschlußströmen, zu schützen. Im Prinzip arbeiten sie auf elektromagnetischer Grundlage. Der Strom durchfließt eine Spule, deren Feld bei Überstrom das Öffnen eines Kontakts veranlaßt. Vielfach sind derartige Überstromschalter mit einem Zeitschaltwerk versehen, damit kein Ausschalten bei sehr kurzzeitiger Überlastung (z. B. Einschalten großer Motoren) erfolgen kann. Sonderschalter werden für die verschiedensten Zwecke gebaut. Es gibt z. B. Unterstromausschalter, Überspannungsausschalter, Unterspannungsausschalter, Erdschalter u. a.

Sicherungen sind Geräte, die dem Schutz der Anlage dienen. Sie werden im allgemeinen als Schmelzsicherungen ausgeführt. Für kleinere Leistungen fließt der Strom durch den feinen Draht einer Patrone, der bei Überlastung schmilzt.

Bei größeren Leistungen werden Streifensicherungen verwendet (Bild 7.91.), die aus einer Anzahl parallelgeschalteter Schmelzstreifen bestehen.

Das Einsetzen geflickter Sicherungen ist

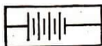


Bild 7.91.
Ansicht einer Streifensicherung

grundsätzlich verboten, das Überbrücken von Sicherungen ist unzulässig. Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen enthalten einen Hauptleiter mit hoher Leitfähigkeit (eigentliche Sicherung) und einen Nebenleiter mit niedrigerer Leitfähigkeit und hohem Temperaturkoeffizienten (zur Unterdrückung des Lichtbogens) sowie Löschpulver, um den möglicherweise doch entstehenden Lichtbogen zu löschen. Man unterscheidet Sicherungen, die sofort bei Überschreitung des zulässigen Stroms ansprechen (flinke Sicherungen) und solche, die erst reagieren, wenn der Überstrom längere Zeit wirksam ist (träge Sicherungen).

Schalter, Trenner, Sicherungen und Transformatoren sind die Hauptelemente von Umspannwerken und Schaltanlagen. Derartige Anlagen werden über Schalttafeln oder Schaltpulse überwacht. Die oben genannten Geräte befinden sich oft in geschlossenen Gebäuden oder sie sind in halboffener Bauweise ausgeführt. In der halboffenen Bauweise, die bei Umspannanlagen von Hoch- auf Niederspannung bevorzugt wird, wird die Niederspannungsschaltanlage in Gebäuden angeordnet.

In neuerer Zeit wird die Freiluftbauweise bevorzugt. Alle Geräte befinden sich, mit Ausnahme der Überwachungszentrale, im Freien. Diese Bauweise erfordert zwar robustere Geräte, ist aber sonst billiger. Vor allem sind aber ihre Anpassungsfähigkeit, ihre Übersichtlichkeit und ihre geringe Störanfälligkeit sowie geringe Bau- und Instandsetzungszeiten von großem Vorteil. In Gebieten mit starker Luftverschmutzung wird aber die geschlossene Bauweise vorgezogen. Die Transformatoren, Schalter und Trenner arbeiten in den Anlagen nicht im Einzelbetrieb, sondern sind Teile eines Sammelschienensystems der Umspann- oder Schaltanlage (Bild 7.92.).

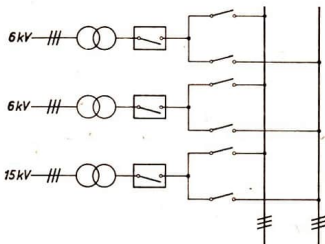


Bild 7.92. Schema eines Sammelschienensystems

Leitungen. Als Material für die Leitungen wird Elektrolytkupfer oder Aluminium verwendet. In der Niederspannungstechnik, besonders bei Hausinstallationen, wird der Leiter meist mit Gummi oder Plast überzogen und zu kabel- oder bandförmigen Leitungen verarbeitet.

Oft wird die Isolierung durch Verlegen in Rohren (Gummirohr, Falzrohr aus Metall, Stahlpanzerrohr) oder durch das Umhüllen mit chemisch beständigen Substanzen (Blei, Kabelmasse, Ölpapier) gegen äußere mechanische oder chemische Beanspruchung geschützt (Bild 7.93.).

Im Bereich hoher Spannungen und Ströme wird die Energie entweder über Freileitungen oder über Kabel transportiert.

Ursprünglich wurden fast ausschließlich Kabel verwendet, die dann nach Einführung des Wechselstroms und mit steigender Höhe der Spannung von Starkstrom-Freileitungen verdrängt wurden. Heute setzt sich aber im Bereich höchster Spannungen wieder das Kabel durch.

Hochspannungs-Freileitungen:

Die Kupferdrähte oder -seile bzw. Aluminiumseile (diese enthalten meist einige Stahldrähte oder bei Hohlseilen vielfach ein gewundenes Stahlband als Träger) (Bild 7.94., Seite 245) werden mittels keramischer Isolatoren an den Auslegern der Maste befestigt. Je nach der Höhe der zu übertragenden Spannung müssen die Isola-

Bild 7.93.
Aufbau eines stark geschützten Niederspannungskabels

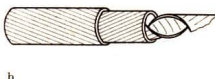
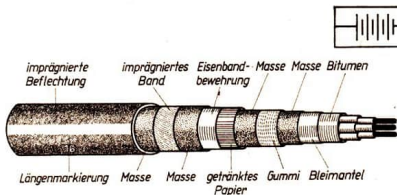


Bild 7.94.
Aufbau von Freileitungsseilen: a Leiterseil mit Stahlseilkern; b Hohlseil mit Stahlband als Träger; c selbsttragendes Hohlseil aus Formdrähten

toren gewählt werden. Ihre oft komplizierte äußere Form erhalten die Isolatoren deshalb, damit das durch Verschmutzungen und Feuchtigkeit begünstigte Auftreten von Kriechströmen und möglichen Überschlägen verhindert wird.

Für Freileitungen sind verschiedene Masttypen erforderlich:

1. Tragmaste (Tragen der Leitung auf geraden Strecken);
2. Winkelmaste (für Winkelpunkte);
3. Abspannmaste (als Festpunkte wenigstens alle drei Kilometer);
4. Endmaste (Aufnahme eines einseitigen Leitungszuges);
5. Kreuzungsmaste (bruchsichere Kreuzungen mit Fernmeldeleitungen, Straßen, Wasserwegen, Eisenbahnen);
6. Abzweig- und Verteilungsmaste (Abzweigen und Verteilen der Leitungen nach verschiedenen Richtungen);

Die Fortleitung großer Energiemengen über relativ große Entfernungen macht die Verwendung hoher Übertragungsspannungen erforderlich, damit diese Übertragung wirtschaftlich ist. Hohe Spannungen führen jedoch zu konstruktiven Schwierigkeiten (die Abstände der Leiter werden größer, bessere Isolatoren müssen verwendet werden) und zu höheren Verlusten durch Abstrahlung (Koronaverluste), besonders bei Schlechtwetter.

Den Koronaverlusten kann man durch eine Vergrößerung des Seilradius entgegenwirken. Deshalb entwickelte man Hohlseile (mit Stahlträgern oder selbsttragende aus Formdrähten, Bild 7.94.) und Bündelleiter, bei denen zwei bis vier dünne Leiter durch Abstandhalter zu einem Bündel zusammengefaßt sind. Das Bündel entspricht

einem Seil mit größerem Durchmesser, so daß sich die Koronaverluste gegenüber einem einfachen Seil gleichen Querschnitts verringern.

Starkstromkabel:

Kabel sind Leitungen, die auf Grund ihrer Isolation z. B. in die Erde oder unter Wasser verlegt werden können. Nach dem Aufbau unterscheidet man: *Massekabel, Ölkabel, Druckkabel*.

Die meisten verlegten Kabel sind Massekabel. Ihren Namen haben sie daher, daß die in ihnen enthaltenen Leiter, abgesehen von Gummibleikabeln, von Papierstreifen umhüllt sind, deren Zwischenräume mit isolierender Masse ausgefüllt sind. Zum Schutz gegen Feuchtigkeit und chemische Angriffe dient ein nahtloser Blei- oder Kunststoffmantel, der oft eine zusätzliche Bewehrung aus Stahlband erhält. Über dem Blei- bzw. Kunststoffmantel oder der Bewehrung liegt oft noch eine in zähen Kompositum gebettete Papierumwicklung (Bild 7.95.). Kabel, die auf Zug beansprucht werden, erhalten eine Flechtstahlbewehrung.



Bild 7.95. Schnitt durch ein Blei-Masse-Kabel



Außerdem gibt es Kabelsonderanfertigungen für spezielle Zwecke (Seekabel, Kabel für Räume, in denen mit besonderen chemischen Angriffen zu rechnen ist usw.).

Das Papier, mit dem die Isolation der Massekabel erfolgt, ist ölgetränkt. Durch die Ausdehnung des Öls ergeben sich in der Isolation unterschiedliche Druckverhältnisse, als deren Folge Hohlräume, Ionisationsvorgänge und Glimmentladungen, die die Isolation beschädigen, entstehen. Die Hohlräume setzen die Durchschlagfestigkeit des Massekabels bei Wechselstrom erheblich herab. Die Übertragung von Gleichstrom dagegen verlangt keine Hohlraumfreiheit. Durch die Materialersparnis bei Gleichspannungskabeln werden diese den Freileitungen wirtschaftlich gleichwertig. Bei Öl- und Druckkabeln wird durch speziellen Aufbau des Kabels angestrebt, die Durchschlagfestigkeit des Kabels zu erhöhen.

Beim Ölkabel (Bild 7.96.) wird der Leiter als Hohlseil ausgeführt, in dessen Hohlraum Öl enthalten ist, das auch die Zwischenräume zwischen den einzelnen Drähten des Leiterseiles ausfüllt. Das dünnflüssige Öl verhindert das Bilden von Hohlräumen und kühlt das Kabelinnere. Ölkabel werden mit Erfolg bei den höchsten bisher vorkommenden Spannungen und für sehr große Leistungen verwendet.

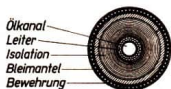


Bild 7.96.
Schnitt durch
ein Ölkabel

Druckkabel sind Massekabel mit blankem Bleimantel, die innerhalb von Stahlrohren verlegt werden. Diese Rohre sind mit Luft oder Stickstoff mit einem Druck bis zu 1,47 MPa gefüllt (Bild 7.97.). Das Bleikabel wird durch den hohen Druck so zusammengepreßt, daß sich keine Hohlräume bilden können. Glimmentladungen werden unterdrückt, die Durchschlagfestigkeit steigt auf das Zwei- bis Dreifache.



Bild 7.97. Schnitt durch ein Druckkabel

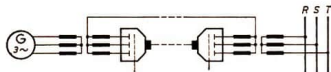


Bild 7.98. Vereinfachtes Schema einer Gleichstrom-Übertragungsanlage

Kabel werden besonders bei der Gleichstrom-Hochspannungs-Übertragung wirtschaftlich. Bild 7.98. zeigt stark vereinfacht, auf welche Weise Gleichstrom übertragen werden kann. Diese Übertragung hat folgende Vorteile:

1. geringe Verluste;
2. Fortfall atmosphärischer Einflüsse;
3. vereinfachte Leitungsführung;
4. keine Hochfrequenzstörungen;
5. Fortfall dielektrischer Verluste;
6. einfachere Herstellung gegenüber Hochspannungsfreileitungen.

7.2.3. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen

Die Umwandelbarkeit elektrischer Energie in alle anderen Energieformen wird technisch ausgenutzt.

1. elektrische Energie → Wärmeenergie
2. elektrische Energie → chemische Energie
3. elektrische Energie → Licht
4. elektrische Energie → mechanische Energie

Umwandlung in Wärmeenergie. Bildet sich zwischen zwei Elektroden ein Lichtbogen aus, so entstehen sehr hohe Temperaturen. Technisch wird diese Wärme in Lichtbogenöfen (Bild 7.99.) genutzt, die zum Schmelzen oder Reduzieren von Metallen verwendet werden.

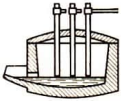
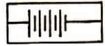


Bild 7.99.
Schematische Darstellung
eines Lichtbogenofens

Bei Stromdurchgang durch ein Metall oder einen anderen Leiter erwärmt sich dieser. Öfen, die diesen Effekt technisch nutzen, heißen Widerstandsöfen (Trockenöfen, Glühöfen, Härteöfen, Brennöfen, Schmelzöfen). Als Widerstandsmaterialien dienen Drähte aus speziellen Legierungen, keramische Widerstände oder flüssige Salzschnmelzen. Wird als Sekundärwicklung eines Niederfrequenztransformators (Bild 7.100.) eine in sich geschlossene Rinne mit metallischem Schmelzgut gewählt, so wird das Schmelzgut erwärmt, wenn der Primärkreis des Transformators vom Strom durchflossen wird.

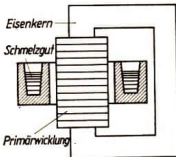


Bild 7.100. Schema eines NF-Induktionsofens

Hochfrequente Ströme ergeben beim Durchgang durch einen metallischen Leiter durch Stromverdrängung (der Strom durchströmt den Leiter dicht unter dessen Oberfläche) Oberflächenenerwärmung. Technisch wird das bei der Oberflächenhärtung (Bild 7.101.), beim induktiven Schweißen und zur Erwärmung von Schmiedegut ausgenutzt.

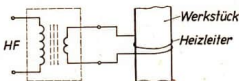


Bild 7.101. Prinzip des Oberflächenhärtens mit HF

Wird ein Tiegel von einer Spule umgeben, die von einem hochfrequenten Strom durchflossen wird (Bild 7.102.), so erwärmt sich das im Tiegel befindliche Gut.

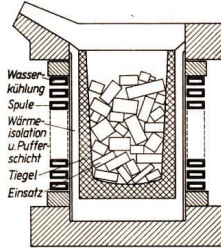


Bild 7.102. Schnitt durch einen HF-Tiegelofen

Umwandlung in chemische Energie. Wird ein Elektrolyt (Salzlösung, Salzschnmelze u. a.) von Gleichstrom durchflossen, so wandern die Ionen zu den gegenpoligen Elektroden und scheiden sich dort ab (Elektrolyse). Werden spezielle Elektrolyten und als positive Elektroden Metalle verwendet, so daß sich auf der negativen Elektrode ein metallischer Überzug bildet, so bezeichnet man dieses Bad als galvanisch. Auf diese Weise erhält man dünne Überzüge von Kupfer, Chrom, Nickel, Silber, Gold auf Metallen oder leitend gemachten Nichtleitern (z. B. durch Pudern mit Graphit). Nach diesem Verfahren können verunreinigte Metalle in reinere Form überführt werden (Bild 7.103.). Rohkupfer wird auf diese Weise in Elektrokupfer überführt, das dann als Leitermaterial geeignet ist.

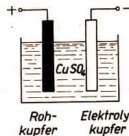


Bild 7.103.
Schema der Elektrokupfer-
gewinnung



Umwandlung in Licht. Licht kann aus elektrischer Energie über hohe Temperaturen aus glühenden Stoffen (Temperaturstrahler) erzeugt werden. Als Glühkörper dienen meistens feine Wolframdrähte, die im allgemeinen besonders gewandelt sind (Einfach-, Doppelwendel) und die sich in einem evakuierten oder mit Stickstoff, Argon oder Krypton gefüllten Glaskolben befinden. Treffen Elektronen auf Gasmoleküle oder -atome, so senden diese eine elektromagnetische Strahlung aus, die im Bereich der Wellenlänge des Lichts liegt. Das auf diese Weise erzeugte Licht ist kalt. Vertreter dieses Lichterzeugungstyps (Gasentladungstrahler) sind z. B. die Quecksilber-Hochdrucklampen (z. B. Straßenbeleuchtung) und die Niederspannungs-Leuchtstofflampe.

Bei der Quecksilber-Hochdrucklampe (Bild 7.104.) befindet sich im Inneren eines Glühlampenkolbens ein Quarzröhrchen, das mit Hg-Dampf bis 1 MPa gefüllt ist und in das die Elektroden eingeschmolzen sind. Wird der Strom eingeschaltet, so beginnt der Quarzbrenner Licht abzustrahlen. Die richtige Lichtstärke erreicht diese Lampe erst nach kurzer Einbrennzeit. Das Licht ist für unser Empfinden zu bläulich, deshalb wird der Glaskolben von innen häufig mit Substanzen bestrichen, die eine Verschiebung der Lichtfarbe mehr zum Rot bzw. zum Gelb verursachen. Manchmal wird außer dem Quarzbrenner noch ein Mischlicht-Glühlwendel eingebaut.

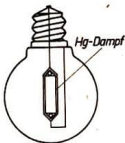


Bild 7.104.
Quecksilber-Hochdrucklampe

Leuchtstoffröhren (Bild 7.105.) sind mit Argon und Quecksilberdampf von niederem Druck gefüllt. Beim Stromdurchgang zwischen den an den beiden Rohrenden angebrachten besonders geformten Elektroden

sendet das Gasgemisch ultraviolettes Licht aus, das durch den Leuchtstoff, der auf der Innenseite des Rohrs aufgebracht ist, in sichtbares Licht umgewandelt wird. Als weitere Lichtquelle wird der Lichtbogen ausgenutzt, der hohe Lichtstärken erzeugt.

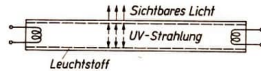


Bild 7.105. Schema des Aufbaus einer Niederspannungs-Leuchtstofflampe

Umwandlung in mechanische Energie. Elektrische Energie wird im allgemeinen mit Hilfe der im folgenden behandelten Elektromotoren in mechanische Energie umgeformt. Dabei wird das elektrodynamische Grundprinzip technisch genutzt, das besagt, daß auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld Kräfte einwirken.

Gleichstrommotoren. Entsprechend den Gleichstromgeneratoren unterscheidet man

1. fremderregte Motoren;
2. Nebenschlußmotoren;
3. Reihenschlußmotoren;
4. Doppelschlußmotoren.

Durch die Rotation des Läufers wird in seinen Wicklungen eine elektromotorische Gegenkraft induziert, die der angelegten Klemmenspannung entgegenwirkt. Für sie gilt wie beim Generator $E = c \cdot \Phi \cdot n$ und wegen $E = U - I \cdot R_a$:

$$n = \frac{U - I \cdot R_a}{c \cdot \Phi}$$

Die Abhängigkeit der Drehzahl eines Gleichstrommotors von der Klemmenspannung und dem Erregerstrom zeigen die Diagramme der Bilder 7.106. und 7.107. Die Höhedes vom Motor aufgenommenen Stroms stellt sich der Belastung entsprechend selbsttätig ein.

Aus obiger Gleichung kann man entnehmen, auf welche Weise die Drehzahl von Gleichstrommotoren verändert werden kann. Man unterscheidet in den Standards zwischen Drehzahleinstellung bei gleich-

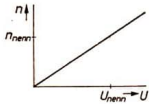


Bild 7.106.
 n - U -Diagramm von
Gleichstrommotoren

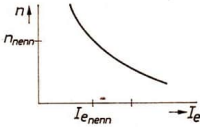


Bild 7.107.
 n - I_E -Diagramm von
Gleichstrommotoren

bleibendem Drehmoment, bei gleichbleibender Leistung und bei quadratisch mit der Drehzahl steigendem Drehmoment. Eine Einstellung der Drehzahl kann nach obiger Gleichung durch Ändern der Stärke des Erregerfeldes (bei Nebenschlußmotoren liegt der Stellwiderstand vor der Feldwicklung, bei Reihenschlußmotoren parallel zur Erregerwicklung), durch Änderung des Ankerkreiswiderstandes oder durch eine Änderung der Klemmenspannung (die Klemmenspannung wird durch eine Steuermaschine erzeugt, z. B. *Leonard-Satz*) erfolgen.

Das Anlassen von Motoren mit höherer Leistung erfolgt über einen Anlaßwiderstand (Kurbelanlasser, Flüssigkeitswiderstände), der im Ankerkreis liegt. Die Änderung des Drehsinns erreicht man durch Änderung der Richtung des Ankerstroms oder des Erregerstroms.

Fremderregte Motoren zeigen fast dasselbe Verhalten wie Nebenschlußmotoren. Zu den fremderregten Motoren gehört beispielsweise der Gleichstrommotor des oben erwähnten *Leonard-Satzes* (Bild 7.108.). Der Steuergenerator, der beispielsweise durch einen Drehstrommotor M_2 angetrieben werden kann, liefert für den Arbeitsmotor M_1 die einstellbare Klemmenspannung. Dadurch kann die Drehzahl von M_1 fast verlustlos und feinstufig zwischen $+n$ und $-n$ (umgekehrter Drehsinn) eingestellt werden.

Die Schaltung eines Nebenschlußmotors mit Hilfsreihenschlußwicklung (GH) zur Kompensation der Ankerrückwirkung (Wendepole), Anlasser (Stellanlasser) und Nebenschlußsteller zeigt Bild 7.110. Das Betriebsverhalten erkennt man aus dem Diagramm des Bildes 7.112. Der Vorteil des Nebenschlußmotors ist die unabhängig vom Drehmoment fast gleichbleibende Drehzahl. Bei Nebenschlußmotoren kann die Drehzahl durch Vergrößern des Ankerkreiswiderstandes (Veränderung von LR) herabgesetzt werden (Bild 7.111.). Drehzahlserhöhung (bei gewöhnlichen Motoren auf das 1,5fache; bei Stellmotoren auf das 3fache der Nenndrehzahl) erreicht man durch Schwächung des Erregerfeldes (Bild 7.113.). Anwendung: Überall, wo gleichbleibende Drehzahl gefordert wird, z. B. Pumpen, Lüfter, Werkzeugmaschinen, Spinnmaschinen, Walzstraßen (oft *Leonard-Satz*), Fördermaschinen.

Die Schaltung eines Reihenschlußmotors mit Wendepolen (GH) und Anlasser (Stellanlasser) zeigt Bild 7.114. Das Betriebsverhalten erkennt man aus dem Diagramm des Bildes 7.115. Der besondere Vorteil dieses Motors ist sein hohes Anlaufmoment.

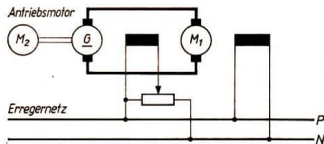


Bild 7.108. Schaltung eines *Leonard-Satzes*

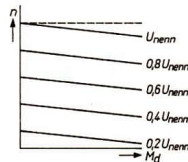


Bild 7.109. n - M_d -Diagramm eines *Leonard-Satzes*

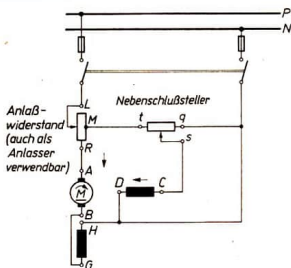


Bild 7.110. Schaltung eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors

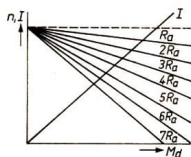


Bild 7.111. n - M_d - und I - M_d -Diagramm bei Regelung der Drehzahl eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors mit Hilfe eines Widerstands im Ankerkreis

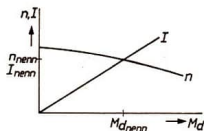


Bild 7.112. n - M_d - und I - M_d -Diagramm eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors

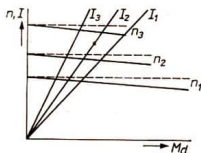


Bild 7.113. n - M_d - und I - M_d -Diagramm bei Regelung der Drehzahl eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors mit Hilfe eines Widerstands im Erregerkreis

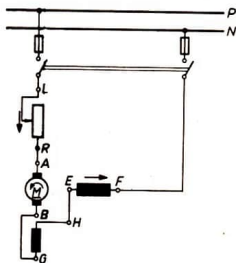


Bild 7.114. Schaltung eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors

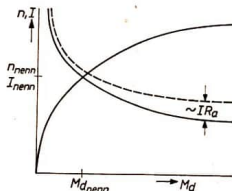


Bild 7.115. n - M_d - und I - M_d -Diagramm eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors

Die Drehzahl wird im allgemeinen durch einen Stellanlasser (LR) eingestellt (Bild 7.116.). Auch Feldschwächung durch parallel zur Erregerwicklung geschalteten Widerstand ist möglich.

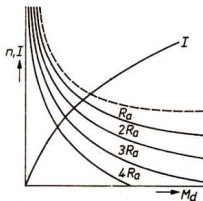


Bild 7.116. n - M_d - und I - M_d -Diagramm bei Stellung der Drehzahl eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors mit Hilfe eines Widerstands im Ankerkreis



Der Reihenschlußmotor darf nicht unbelastet hochgefahren werden, da die Drehzahl sonst so anwächst (der Motor geht durch), daß die auftretenden Fliehkräfte den Motor zerstören. Die Kupplung zur angetriebenen Maschine muß so fest sein, daß eine plötzliche Entlastung des Motors nicht möglich ist.

Anwendung: Für Bahnantriebe (Straßenbahn, S-Bahn) und den Antrieb von Arbeitsmaschinen mit hohem Anzugsvermögen (Hebezeuge).

Die Schaltung eines Doppelschlußmotors zeigt Bild 7.117. Die Hauptschlußwicklung (EF) wirkt im gleichen Sinne wie die Nebenschlußwicklung (CD). Der Motor vereinigt gewisse Eigenschaften des Neben- und Reihenschlußmotors. Das Betriebsverhalten ist aus dem Diagramm des Bildes 7.118. erkennbar.

Anwendung: Für Antriebe, die ein nachgiebiges Drehzahlverhalten oder erhöhtes

Anzugsvermögen und Anlaufmoment erfordern (Hebezeuge, Baggerantriebe, Winden, Kompressoren, Ziehpressen, Pressen).

Wechselstrommotoren. Man unterscheidet die folgenden wichtigen Motortypen für Wechselstrom:

1. Synchronmotoren;
2. Asynchronmotoren oder Induktionsmotoren
 - a) Motoren mit Kurzschlußläufer,
 - b) Motoren mit Schleifringläufer,
 - c) Motoren für Einphasenbetrieb;
3. Wechselstrom-Kollektor-Motoren
 - a) Drehstrom-Reihenschlußmotoren,
 - b) Drehstrom-Nebenschlußmotoren,
 - c) Einphasen-Reihenschlußmotoren,
 - d) Einphasen-Repulsionsmotoren.

Synchronmotoren:

Das Bild 7.119. zeigt in schematischer Vereinfachung den Stator eines Drehstrommotors. Im allgemeinen haben derartige Motoren keine ausgeprägten Erregerpole, sondern die Erregerwicklung ist in Nuten über den ganzen Umfang des Ständers verteilt. Die den einzelnen Phasen zugeordneten Wicklungen sind dabei so angeordnet, daß ihre räumliche Versetzung der zeitlichen Verschiebung der Spannungen und Ströme entspricht (Motoren mit der Polpaarzahl 1 haben drei um $2,09$ rad versetzte Wicklungen, Motoren mit der Polpaarzahl 2 haben sechs Wicklungen, die jeweils um 262 mrad versetzt sind).

Werden die drei Wicklungen (eines Motors mit der Polpaarzahl 1) an ein Drehstromnetz gelegt, so entsteht zwischen ihnen ein

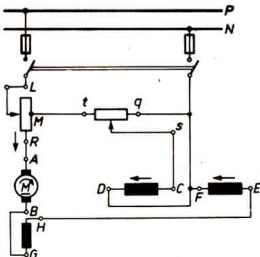


Bild 7.117. Schaltung eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors

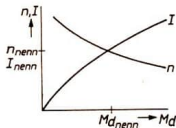


Bild 7.118. n - M_d - und I - M_d -Diagramm eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors

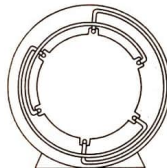


Bild 7.119. Stator eines Drehstrommotors

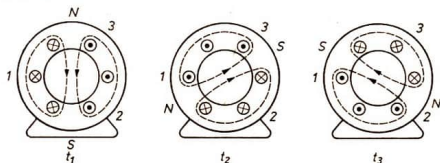


Bild 7.120.
Zur Entstehung des Drehfeldes

rotierendes Feld, obwohl der Stator feststeht (Bild 7.120.). Für die Drehzahl n in min^{-1} des Feldes gilt:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

mit p als der Polpaarzahl und f als Netzfrequenz in s^{-1} . Stellt man sich im Inneren eines Drehstrommotorstators einen drehbar gelagerten Dauermagneten vor, so wird dieser von dem umlaufenden Feld mitgenommen und läuft synchron mit dem Drehfeld mit. Das ist das Arbeitsprinzip des Synchronmotors. Sein Rotor (Läufer) ist meist ein mehrpoliger Elektromagnet (Polrad). Das Prinzip zeigt Bild 7.121.

Der Synchronmotor bedarf besonderer Anlaßhilfen, da er kein Anlaufmoment entwickelt. Kleine Motoren können von Hand auf synchrone Drehzahl gebracht werden (Anwurf). Motoren mittlerer Leistung be-

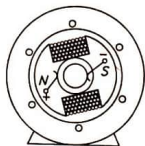


Bild 7.121.

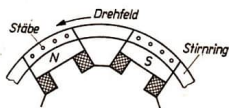


Bild 7.122. Anlaufkäfig

sitzen häufig zusätzlich eine sogenannte Kurzschlußwicklung (Anlaufkäfig) auf dem Anker (in den Anker eingelassene Stäbe aus leitendem Material, die durch Stirnrings aus gleichem Material verbunden sind, Bild 7.122.). Das Drehfeld läuft nach dem Einschalten zunächst über die kurzgeschlossene Wicklung hinweg und induziert in ihr eine Spannung, die einen Strom durch die Stäbe und Stirnrings treibt. Als Folge davon tritt ein Drehmoment auf; die Maschine läuft hoch. Schaltet man nun den Erregerstrom zu, so wird der Motor in Synchronismus mit dem Drehfeld gezogen. Bei großen Motoren (und Generatoren) muß durch einen besonderen Anwurfmotor (durch Antriebsmaschine) synchroner Lauf erreicht werden, bevor sie an das Netz gelegt werden können. Der Motor läuft also zunächst als Generator. Nun vergleicht man Generator- und Netzspannung bezüglich der Höhe, der Frequenz und der Phasenlage, denn das Zuschalten darf erst erfolgen, wenn in allen drei Bestimmungsstücken Übereinstimmung besteht.

Die Phasenlage bestimmt man vielfach mit Hilfe der Dunkelschaltung (Bild 7.123.). Es

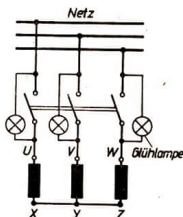


Bild 7.123.
Dunkelschaltung



darf nur zugeschaltet werden, wenn alle drei Glühlampen dunkel bleiben. (Wenn eine Glühlampe leuchtet, bedeutet das, daß zwischen der von der Maschine erzeugten Spannung und der Spannung des Netzes noch ein Unterschied besteht, der nur durch eine Phasenverschiebung zustande kommen kann, da ja die Spannung und Frequenz laut Anzeige der entsprechenden Instrumente übereinstimmen.)

Wie bereits der Name sagt, läuft der Motor mit der Drehzahl des Drehfeldes um, gleichgültig, wie groß die Belastung ist. Wird die Belastung wesentlich über das Nenndrehmoment hinaus gesteigert, so bleibt der Motor schließlich unter Kurzschluß stehen (Kippmoment).

Die Wicklungen von Wechselstrommotoren und Transformatoren sind für das Netz eine starke induktive Belastung. Bei der Konstruktion von Wechselstrommotoren versucht man, einen möglichst günstigen $\cos \varphi$ zu erzielen. Da auch Blindleistung das Netz belastet, fordern die Energieverteiler eine besondere Bezahlung für die durch den Verbraucher verursachte Blindleistung. Bei kleineren Anlagen werden Kondensatoren eingebaut, die die induktive Blindleistung möglichst kompensieren (Phasenschieberkondensatoren). Größere Anlagen werden mit leerlaufenden Synchronmaschinen ausgestattet, die im übererregten bzw. untererregten Zustand Blindleistung erzeugen bzw. verbrauchen (Phasenschiebermaschine).

Anwendung: Phasenschieber, Antrieb größerer *Leonard-Sätze*, als langsamlaufende Synchronmotoren für den Antrieb von Kolbenverrichtern, für den direkten Schraubenantrieb auf (turboelektrischen oder diesel-elektrischen) Schiffen, als Schnellläufer für den Antrieb von Umformern und Zentrifugalverrichtern.

Asynchronmotoren:

Diese Motoren laufen, wie ihr Name schon sagt, nicht synchron mit dem Drehfeld um. Zwischen der Drehzahl des Feldes n_F und der Drehzahl des Läufers n_L besteht eine

Differenz, die bezogen auf n_F als Schlupf s bezeichnet wird:

$$s = \frac{n_F - n_L}{n_F} \cdot 100\%$$

Beide Bautypen des Asynchronmotors (Kurzschlußläufermotor und Schleifringläufermotor) haben einen Stator, der mit dem von Synchronmaschinen übereinstimmt. Jedoch sind die Läufer anders aufgebaut. Beim Kurzschlußläufer besteht die Wicklung aus Kupferstäben, die isoliert in den Nuten des Läufers liegen und an den Stirnseiten durch Ringe kurzgeschlossen sind (Bild 7.124.). Anstelle der Kupferstäbe wird auch Aluminiumspritzguß angeordnet. Die Eigenschaften des Motors werden durch die Formen der Stäbe stark beeinflusst. Man unterscheidet deshalb noch weiter: Doppelkäfigläufer, Hochstabläufer, Keilstabläufer. Der Schleifringläufer trägt eine Wicklung, die ganz analog zur Ständerwicklung ausgeführt ist. Die Wicklungsenden führen einerseits zu einem Sternpunkt und andererseits zu Schleifringen (Bild 7.125.). Diese Schleifringe werden über äußere Widerstände gleichfalls kurzgeschlossen. Legt man an den Ständer des Asynchronmotors das Netz, so läuft das Drehfeld sofort nahezu trägheitslos an. In dem noch stillstehenden Läufer wird eine Spannung induziert, die durch die kurzgeschlossene Läuferwicklung einen Strom treibt. Als Folge dieses Stroms ergibt sich nach dem elektrodynamischen Grundgesetz ein Drehmoment,

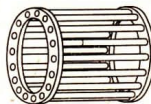


Bild 7.124.
Kurzschlußläuferkäfig

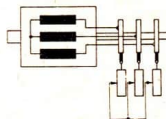


Bild 7.125.
Schematische Darstellung eines Schleifringläufers



der Motor beginnt hochzulaufen. (Der Antrieb des Läufers erfolgt also durch die induzierte Spannung, daher der oft gebrauchte Name Induktionsmotor.) Die Relativgeschwindigkeit des hochlaufenden Läufers gegenüber dem Drehfeld wird immer geringer, damit verringert sich auch die induzierte Spannung und damit die Ursache für die Bewegung des Läufers. Der Motor kann also nie synchron mit dem Drehfeld umlaufen, da dann die Ursache für die Bewegung ausbliebe; der Motor läuft asynchron.

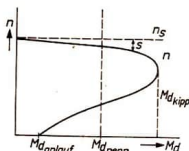


Bild 7.126. n - M_d -Diagramm eines Kurzschlußläufermotors

Der Asynchronmotor zeigt Nebenschlußverhalten (Bild 7.126.). Wird die Belastung über das Nenn Drehmoment hinaus gesteigert, so verringert sich die Drehzahl stärker, bis schließlich ein maximales Drehmoment (Kippmoment $M_{d\text{kipp}}$) erreicht wird. Eine Stellung der Drehzahl beim Kurzschlußläufer (und auch beim Synchronmotor) ist (ohne zu großen Aufwand) möglich, wenn die Statorwicklung so ausgeführt ist, daß durch Umschalten die Anzahl der Polpaare verändert werden kann. Die Wicklung derartiger Motoren ist recht teuer, aber diese Art der Drehzahlstellung ist sehr wirtschaftlich, da keine Verluste auftreten.

Wird dagegen der Schleifringläufer über stellbare Widerstände kurzgeschlossen, so läßt sich die Drehzahl durch Ändern der Widerstände stellen (Bild 7.127.). (Bei wachsendem Widerstand sinkt der Strom im Läufer und damit das Drehmoment, der Schlupf vergrößert sich.) Aus Bild 7.127. ist ersichtlich, daß aber mit wachsendem Widerstand das Nebenschlußverhalten ver-

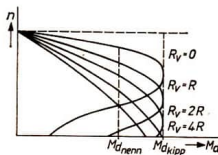


Bild 7.127. n - M_d -Diagramm eines Schleifringläufermotors bei verschiedenen Vorwiderständen

lorengeht, die in den Widerständen umgesetzte Leistung wird in nutzlose Wärme verwandelt.

Der Drehsinn eines Asynchronmotors kann auf einfache Weise geändert werden: zwei beliebige Anschlüsse werden vertauscht.

Beim Einschalten eines Kurzschlußläufermotors tritt, wenn er an voller Spannung liegt, ein erheblicher Stromstoß auf. Um ihn zu vermeiden, wird bei allen Motoren größerer Leistung die sogenannte Stern-Dreieck-Schaltung angewendet. Zuerst wird die Erregerwicklung in Sternschaltung an das Netz gelegt, über jeder Wicklung liegt

die Spannung $\frac{U}{\sqrt{3}}$. Daraus folgt:

$$P_{\text{Stern}} = \left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{1}{R} = U \cdot I_{\text{Stern}};$$

$$I_{\text{Stern}} = \frac{U}{3R}.$$

Wird nun auf Dreieck umgeschaltet, liegt die volle Spannung an jeder Wicklung; es gilt

$$P_{\text{Dreieck}} = \frac{U^2}{R} = U \cdot I_{\text{Dreieck}}; \quad I_{\text{Dreieck}} = \frac{U}{R}.$$

Daraus folgt, daß der Einschaltstromstoß bei Sternschaltung nur ein Drittel des Stromstoßes bei Dreieckschaltung beträgt.

Nachteilig ist, daß sich das Anlaufdrehmoment auch um ein Drittel vermindert. Ein erhöhtes Anlaufmoment wird dadurch erzielt, daß man besondere Käfigformen wählt (Doppelkäfigläufer, Hochstab- oder Keilstabläufer).

Diese Läufer werden als Stromverdrängungsläufer bezeichnet. Prinzipiell ist es so, daß die Wicklung in der Nähe des Ankerumfangs einen größeren Ohmschen Wider-



stand hat (aber einen relativ kleinen Blindwiderstand), während der *Ohmsche* Widerstand der Wicklung im Inneren des Läufers wegen des größeren Leiterquerschnittes wesentlich geringer ist (der Blindwiderstand ist wegen der größeren Streuung groß).

Beim Anlauf fließt deshalb der Strom (er ist wegen des hohen *Ohmschen* Widerstandes relativ klein) in den Leitern an der Peripherie des Läufers, während die innere Wicklung wegen der hohen Schlupffrequenz einen sehr hohen Widerstand darstellt, durch den praktisch kein Strom fließt. Der Einschaltstromstoß bleibt also gering, trotzdem ist das Anlaufmoment beachtlich. Mit Verringerung der Schlupffrequenz sinkt jedoch dieser Widerstand, und bei der Nenn-drehzahl fließt der Betriebsstrom durch den tiefer im Läufer befindlichen Leiter.

Anlaufschwierigkeiten dieser Art treten beim Schleifringläufer nicht auf, weil durch den regelbaren Läuferwiderstand der Einschaltstromstoß beliebig klein gemacht werden kann. Aus den Kennlinien (Bild 7.127.) ersieht man, daß durch die vorgeschalteten Widerstände auch das Anlaufdrehmoment vergrößert wird.

Wird beim laufenden Asynchronmotor eine Phase unterbrochen, so läuft der Motor trotzdem weiter, da das entstehende Wechselfeld in zwei gegenläufige Drehfelder zerlegt werden kann, von denen das wirksam wird, das mit der Drehrichtung des Motors im Dreiphasenbetrieb zusammenfällt.

Schließt man die dritte Statorwicklung über ein phasenschiebendes Glied (Kondensator) an eine der zwei verbliebenen Phasen an, so läuft der Motor (Einphasen-Asynchronmotor) auch hoch.

Bei Erreichen einer bestimmten Drehzahl kann der Kondensator durch einen Fliehkraftschalter abgeschaltet werden; der Motor läuft weiter. Motoren, die für den Einphasenbetrieb vorgesehen sind, enthalten die Hauptwicklung und eine um 1,57 rad versetzte Hilfswicklung, die über einen Kondensator zum Hochlauf eingeschaltet wird. Nach erfolgtem Anlauf kann

dieser Kondensator ganz oder zum Teil zur Phasenverbesserung eingeschaltet bleiben (Kondensatormotor).

Wechselstrom-Kollektor-Motoren:

Die andere große Gruppe von Wechselstrommotoren besitzt, ähnlich wie die Gleichstrommotoren, einen Stromwender. Derartige Kollektormotoren werden zunehmend in der Industrie eingesetzt.

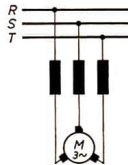


Bild 7.128.
Prinzip des Drehstromreihenschlußmotors

Der Drehstromreihenschlußmotor zeigt ein Drehzahlverhalten, das dem des Gleichstromreihenschlußmotors näherungsweise entspricht. Auch in der Schaltung zeigen beide Motortypen Ähnlichkeiten (Bild 7.128.), jedoch ist der Aufbau des Drehstrommotors viel komplizierter, beispielsweise wird der Läufer meist über einen Transformator (Zwischenumspanner) gespeist. Die Drehzahl des Motors kann stufenlos durch das Verdrehen des Bürstenapparats verändert werden.

Drehstromnebenschlußmotoren zeigen typisches Nebenschlußverhalten. Bei ihnen wird

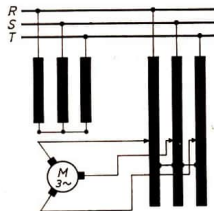


Bild 7.129. Prinzip des ständergespeisten Drehstromnebenschlußmotors



je nach der Speisung zwischen ständer- und läufergespeistem Drehstromnebenschlußmotor unterschieden. Der Vorteil dieses Motortyps besteht in der verlustlosen Drehzahlregelung durch Verschieben des Bürstensatzes und der Kompensation der Phasenverschiebung ($\cos \varphi = 1$). Zum komplizierten Aufbau und zur Arbeitsweise dieser Drehstrommotoren sowie einer Vielzahl speziellerer Anlagen (Regelsätze, Drehtransformatoren u. a.) siehe [16], [18], [19].

Einphasenreihenschlußmotoren:

Werden die Zuleitungen eines Gleichstromreihenschlußmotors vertauscht, so ändert sich der Drehsinn des Motors nicht. Das bedeutet, daß man diesen Motor im Prinzip auch mit Wechselstrom betreiben kann. Bei Gleichstrommotoren besteht das Magnetgestell aus massivem Eisen. Will man jedoch diesen Motor mit Wechselstrom betreiben, so muß der Ständer gleichfalls aus Dynamo-blech aufgebaut werden, weil sonst durch den sich zeitlich ändernden Fluß im massiven Eisen hohe Wirbelstromverluste auftreten würden. Der sich ändernde Fluß induziert im leitenden Material des Magnetgestells eine Spannung, die den Wirbelstrom antreibt. Der Einphasenreihenschlußmotor zeigt typisches Reihenschlußverhalten. Seine Drehzahl kann auf die gleiche Weise wie beim Gleichstromreihenschlußmotor verändert werden.

Für kleine Leistungen (bis 350 W) wird der Einphasenreihenschlußmotor als Universalmotor (für Gleich- und Wechselstrom) gebaut. Wir finden ihn als Antriebsmotor in Haushalt- und Büromaschinen sowie in Elektrowerkzeugen (Handbohrmaschine). Einphasenreihenschlußmotoren großer Leistung werden für den Antrieb elektrischer Lokomotiven verwendet. Daher werden Motoren dieses Typs oft als Bahnmotoren bezeichnet. Die Spannung des Fahrdrabts (15 kV) wird durch einen besonderen Stelltransformator auf die Motorspannung (60 V bis 800 V) umgespannt. Durch die Einstellung der Sekundärspannung wird die nahezu verlustlose Drehzahlverstellung möglich.

Beim Repulsionsmotor erhält die Läuferwicklung ihre Leistung transformatorisch von der Ständerwicklung. Je Polpaar der Ständerwicklung ist der Repulsionsmotor mit einem Paar Bürsten ausgestattet, die übereinen Kupferbügel kurzgeschlossen sind (Bild 7.130.). Die Einstellung der Drehzahl und des Drehsinns erfolgt durch Verdrehen des Bürstensatzes. Der Repulsionsmotor wird vorwiegend für den Antrieb von Krananlagen, Lüftern und Spinnmaschinen verwendet.

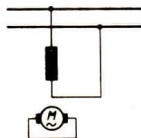


Bild 7.130. Prinzip des Repulsionsmotors

7.2.4. Verstärkung elektrischer Energie

Für die Steuerung und Regelung von elektrischen Maschinen und Einrichtungen werden vielfach verstärkende Anlagen benötigt. Derartige Verstärker können aus Verstärkermaschinen bestehen, sie können aber auch durch magnetische oder elektronische Verstärker verwirklicht werden.

Verstärkermaschinen sind meistens Gleichstromgeneratoren, die durch einen speziellen Aufbau (Querfeldmaschinen) nachteilige Eigenschaften üblicher Gleichstromgeneratoren entbehren und gleichzeitig die Verstärkung mehrerer Ströme ermöglichen. Eigentlich ist jede Gleichstrommaschine ein Verstärker, denn ihre Erregerleistung beträgt je nach Bauart der Maschine 1 bis 10 % der Ausgangsleistung.

Magnetische Verstärker sind Drosseln, deren Induktivität durch das Überlagern einer geringen Gleichstromleistung geändert werden kann. Magnetische Verstärker sind außerordentlich robust und bedürfen kaum einer Wartung. Sie werden in steigendem Maß verwendet.



Die elektronischen Verstärker können mit Hochvakuumröhren, Thyratrons (Stromtore, gasgefüllte Röhren) oder steuerbaren Stromrichtern ausgestattet werden. Elektronische Verstärker haben meist einen sehr hohen Verstärkungsgrad, müssen jedoch sorgfältig gewartet werden und sind für den rauen Betrieb in manchen Starkstromanlagen nicht besonders gut geeignet, siehe auch [10], [21].

7.3. Elemente der Informationselektrik

Die elektrische Energie wird in ständig zunehmendem Maße als Informationsträger verwendet. Angefangen bei der ersten Telefonieübertragung von *Philipp Reis* im Jahre 1861 bis zur modernen Farbfernsehübertragung, vom *Gaußschen* Nadeltelegraphen bis zum Nachrichtenaustausch mit Hilfe von Satelliten: In jedem Fall wird die gegebene Information (das, was übermittelt werden soll) in Spannungs- oder Stromänderungen bzw. Feldänderungen umgewandelt, die dann durch eine Reihe von Hilfseinrichtungen über den Informationskanal an den Empfänger übertragen werden, in dem dann gleichfalls durch Hilfseinrichtungen die Information so wiederhergestellt wird, daß sie verarbeitet werden kann.

Das Gebiet der Informationselektrik (darunter faßt man alles das zusammen, was mit der elektrischen Übertragung von Informationen zu tun hat) ist so vielseitig, daß hier nur ein kleiner Einblick gegeben werden kann, siehe insbesondere [29], [30], [31], [32], [33], [34], [37], [38], [40], [42].

Zu diesem Zweck gehen wir vom Schema einer Informationsübertragung aus. Das Bild 7.131. zeigt einen Blockschaltplan, der alle wesentlichen Teile einer Informations-

kette (Folge von Einrichtungen, die zur Übertragung einer Information erforderlich sind) enthält. Das bedeutet nicht, daß alle Elemente dieser abstrakten Informationskette unbedingt bei jeder Informationsübertragung vorhanden sein müssen. Eine Informationskette zur Übertragung von Informationen mit Hilfe eines einfachen Morsetelegraphen enthält z. B. keine Baugruppen zur Erzeugung, Modulation und Demodulation von Schwingungen.

Sich wiederholende Baugruppen, z. B. Verstärker, wurden zur Vereinfachung nur einmal in der Sende- bzw. Empfangseinrichtung eingezeichnet.

Aus Bild 7.131. geht hervor, daß eine Information mit Hilfe der elektrischen Energie als Träger durch das Zusammenspiel folgender Baugruppen übertragen werden kann: 1. Informationswandler; 2. Verstärker; 3. Schwingungserzeuger; 4. Modulatoren bzw. Demodulatoren; 5. Informationskanal; 6. Stromversorgungsteil.

7.3.1. Informationswandler

Als Informationswandler sollen hier die Geräte bezeichnet werden, mit deren Hilfe gegebene Informationen so umgeformt werden, daß sie über elektrische Einrichtungen transportiert werden können bzw. mit deren Hilfe Informationen, die in Form elektrischer Spannungs- oder Stromänderungen vorliegen, wieder in eine Form gebracht werden, daß sie verarbeitet werden können.

Man muß also zwischen zwei Formen derartiger Informationswandler unterscheiden:

1. Wandler, mit deren Hilfe Informationen in die Form gebracht werden, daß sie mit den Mitteln der Elektrotechnik übertragen werden können;

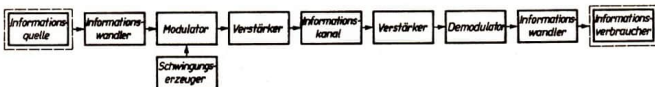


Bild 7.131. Schema einer Informationskette



2. Wandler, mit deren Hilfe Informationen, die mit den Mitteln der Elektrotechnik übertragen wurden, so umgeformt werden, daß sie verarbeitet werden können.

Es gibt eine derartige Vielfalt von Informationswandlern, daß an dieser Stelle nur einige wenige näher betrachtet werden können.

Man muß sich nämlich vor einer zu engen Betrachtung des Begriffs Information hüten; auch Angaben über die Dehnung eines Metallstabs, über die Temperatur in einem Hochofen, über die Drehzahl eines Motors, auch Angaben über den Spannungsabfall längs einer Spannungsabfallstrecke können Informationen sein. In diesem Sinn sind also auch Dehnungsmeßstreifen, Pyrometer, Tachometer, Spannungsmesser u. v. a. als Informationswandler zu betrachten, siehe 8. Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Seite 287ff.

Wir wenden uns zuerst den Informationswandlern zu, die unter 1. aufgeführt sind. Als sehr einfache Form eines Wandlers kann ein Schalter betrachtet werden. Schließt man ihn, so kann an weit entfernter Stelle durch einen Strommesser ein fließender Strom nachgewiesen werden, der (natürlich bei entsprechender Anordnung) anzeigt, daß der Schalter geschlossen ist. Das Schließen des Schalters kann als Folge eines an-

deren Vorgangs auftreten, der damit über den Strommesser gemeldet wird. Ein solcher Schalter braucht nicht nur auf mechanischem Wege zu funktionieren, vielmehr kann er durch Temperaturen (Bild 7.132.), durch Belichtung, durch Unterbrechen eines Lichtstrahls (Bild 7.134.), durch Schall, Rauch usw. ausgelöst werden. Solche Einrichtungen werden vielfach als Schutz-, Steuerungs- und Alarmanlagen verwendet. Auch die Taste einer Morseanlage ist hinsichtlich ihrer Wirkung nichts anderes als ein Schalter.

Ein anderer bekannter Informationswandler, der wegen seiner technischen Bedeutung hier etwas näher betrachtet werden soll, ist das Mikrofon. Mit seiner Hilfe werden Informationen, die in Form akustischer Schwingungen vorliegen, in die Form elektrischer Schwingungen übergeführt.

Mikrofon (akusto-elektrischer Informationswandler). Mit Hilfe von Mikrofonen werden Luftschwingungen (Schall) in elektrische Wechselspannungen umgesetzt. Nach der elektrischen Wirkung unterscheidet man zwischen Kontakt-, Kondensator-, elektrodynamischen und piezoelektrischen Mikrofonen (Kristallmikrofone). Daneben gibt es weitere Mikrofontypen, die auf anderen elektrischen Vorgängen beruhen. Nach ihrer Empfindlichkeit bezüglich der

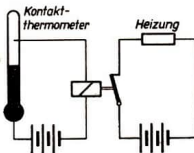


Bild 7.132. Schema einer Temperaturregelung

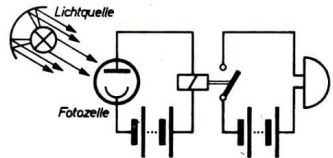


Bild 7.134. Schema einer Warnanlage

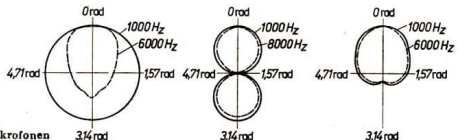


Bild 7.133. Charakteristiken von Mikrofonen

Richtung des einfallenden Schalls unterscheidet man Mikrofone mit Kugel-, Achter- oder Nierencharakteristik (Bild 7.133.).



Bild 7.135.
Schaltzeichen für ein Mikrofon

Kontaktmikrofon:

Dieser Mikrofontyp ist wegen seines einfachen Aufbaus am weitesten verbreitet. Allerdings ist die Qualität der Übertragung geringer, doch für viele Zwecke (z. B. Telefone) völlig ausreichend. Die Schwingungen einer Membran verändern bei Kontaktmikrofonen den Widerstand einer Schicht aus feingebrochener Kohle (Anthrazit). Dieser Kohlegrieß liegt zwischen einer aus Anthrazitpulver gepreßten Membran und einer Kohlelektrode (Bild 7.136.).

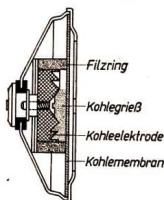


Bild 7.136. Schematische Darstellung und Schaltung eines Kontaktmikrofons



Kondensatormikrofon:

Kondensatormikrofone sind besonders hochwertig. Die Membran bildet mit einer festen Platte einen Kondensator, dessen Kapazität (ungefähr 100 pF) sich im Rhythmus des auftretenden Schalls ändert. Bildet ein Kondensatormikrofon die Kapazität eines Parallelresonanzkreises, so wird die diesen Kreis anregende Hochfrequenz mit der Frequenz des auftretenden Schalls amplitudenmoduliert; wird aber die Hochfrequenz in diesem Schwingkreis erzeugt, so wird sie mit der Frequenz des auftretenden Schalls frequenzmoduliert (vgl. Seite 276). Gewöhnlich wird das Mikrofon in der Niederfrequenz-

schaltung verwendet (Bild 7.137.). Konstruktiv ergeben sich bei Kondensatormikrofonen Schwierigkeiten, da der Abstand zwischen Membran (dünne Aluminiumfolie) und Gegenelektrode gering sein muß (etwa 10^{-3} mm) und das eingeschlossene Luftpolster die Schwingfähigkeit der Membran einschränkt. Dieser Schwierigkeit begegnet man dadurch, daß man die Gegenelektrode mit Schlitzten oder Vertiefungen versieht (Bild 7.137.).

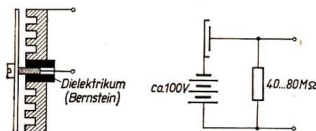


Bild 7.137. Schematische Darstellung eines Kondensatormikrofons und Niederfrequenzschaltung eines Kondensatormikrofons

Elektrodynamisches Mikrofon:

Der auftretende Schall bewegt einen Leiter im Magnetfeld. In diesem Leiter wird eine dem Schall entsprechende Wechselspannung induziert. Man unterscheidet zwei Typen:

1. Bändchenmikrofon
(ein feines Band aus geriffeltem Aluminium schwingt zwischen den Polen eines Permanentmagneten, Bild 7.138.);
2. Tauchspulmikrofon
(eine an der Membran befestigte Spule taucht in den Ringspalt eines Dauermagneten, Bild 7.139.).)

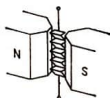


Bild 7.138.
Prinzip des Bändchenmikrofons

Piezoelektrisches Mikrofon (Kristallmikrofon):

Einige Kristalle (z. B. Quarz und Seignettesalz) haben die Eigenschaft, daß an ihrer

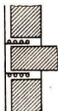


Bild 7.139.
Prinzip des Tauchpulkmikrofons

Oberfläche eine Ladung entsteht, wenn der Kristall mechanisch verformt wird. Aus künstlich gezüchteten Seignettesalzkristallen schneidet man unter Berücksichtigung der Kristallstruktur dünne Plättchen, die beidseitig mit einer Metallfolie versehen werden. Zwei solche Plättchen werden aufeinandergeklebt. Man vereinigt zwei derartige Doppelpättchen (Bieger) in einer Kapsel zu einer Klangzelle (Bild 7.140.). Wirkt der Schalldruck auf eine Klangzelle (ungefähr 1 cm^2), so tritt an den äußeren Klemmen eine Wechselspannung auf.



Bild 7.140.
Schematische Darstellung eines Kristallmikrofons

Bildaufnehmeröhren (optisch-elektrische Informationswandler). Bei den Bildaufnehmeröhren (deren System sich in hoch evakuierten Gefäßen befindet) unterscheidet man im allgemeinen nach ihrer Arbeitsweise und ihrem Aufbau zwischen

1. Ikonoskopen (mit und ohne Vorabbildung);
2. Orthikons (mit und ohne Vorabbildung);
3. Vidikons.

Die genannten Typen, besonders die Orthikons, finden beim Fernsehen Verwendung. Die Vidikons werden überwiegend im industriellen Fernsehen, neuerdings besonders in volltransistorierten Kameras für Außenübertragungen eingesetzt.

Im Prinzip wird der Gegenstand mit Hilfe einer Glasoptik auf ein Mosaik aus lichtempfindlichen Materialien projiziert. Dieses Mosaik wird dann durch einen Elektronenstrahl abgetastet. Man erhöht die Empfindlichkeit von Ikonoskopen und Orthikons dadurch, daß man das Bild auf

eine hochempfindliche Fotoschicht projiziert, die von der Schicht abgegebenen Elektronen beschleunigt und mittels einer magnetischen Optik auf eine Speicherelektrode aufrallen läßt. Dadurch entsteht ein stärkeres Ladungsbild, das dann abgetastet wird (Vorabbildung).

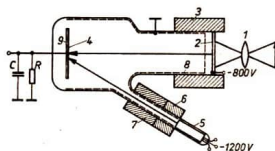


Bild 7.141. Schematische Darstellung eines Ikonoskops mit Vorabbildung

Ikonoskop (mit Vorabbildung, Bild 7.141.): Die Optik (1) bildet den Gegenstand auf der Fotokatode (2) ab. Dort werden Fotoelektronen in größerer Anzahl ausgelöst, die mittels der elektronischen Optik (3) auf die aus Glimmer bestehende Speicherplatte (4) geleitet werden. Dort entsteht durch Sekundäremission ein Ladungsbild (die Stellen, die den hellen Partien des abgebildeten Gegenstandes entsprechen, sind positiv), das durch den in (5) erzeugten, durch die magnetische Linse (6) gebündelten und durch das Ablenssystem (7) gesteuerten Elektronenstrahl abgetastet wird (vgl. Seite 261). Die Stelle, die im Augenblick abgetastet wird, nimmt gegenüber dem Wandbelag (8) ein Potential von etwa 3 V an. Ein Punkt, der einem unbeleuchteten Punkt des Gegenstandes entspricht, fällt nach der Abtastung auf etwa $-1,5 \text{ V}$. Der einem beleuchteten Gegenstandspunkt entsprechende Punkt auf der Speicherplatte hat ein seiner Helligkeit entsprechendes höheres Potential (z. B. $0,5 \text{ V}$). Der Unterschied zwischen dem Potential unmittelbar vor dem Moment der Abtastung und diesem selbst (unbeleuchtet $4,5 \text{ V}$, beleuchtet z. B. $2,5 \text{ V}$) ist das Bildsignal, das über die Metallplatte (9) aus der Röhre heraus übertragen wird.

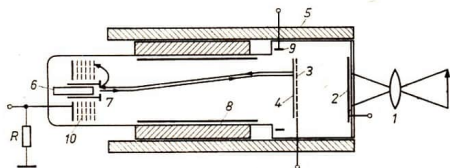


Bild 7.142.
Schematische Darstellung eines
Orthikons mit Vorabbildung

Orthikon (mit Vorabbildung, Bild 7.142.): Die Optik (1) bildet den Gegenstand auf der Fotokatode (2) ab. Die Speicherelektrode besteht aus einem sehr feinmaschigen Drahtnetz (3) und aus einer dünnen Glasfolie mit der besonderen Eigenschaft, in Richtung ihrer geringsten Dicke eine gute und quer dazu eine schlechte Leitfähigkeit zu besitzen. (Ein Ladungsausgleich zwischen den Bildelementen wird dadurch weitgehend herabgesetzt.) Die von (2) abgegebenen Elektronen werden durch die magnetische Optik (5) gebündelt und ergeben auf der Glasfolie ein Ladungsbild, das durch einen zwischen der Katode (6) und der Anode (7) erzeugten und durch das Ablensystem (8) gesteuerten Elektronenstrahl abgetastet wird (vgl. Seite 262).

Die Ladung des Rings (9) bremsst vermöge seiner negativen Ladung die Elektronen ab, so daß sie vor Erreichen des Ladungsbildes umkehren. Nur dort, wo die Glasfolie positiv aufgeladen ist, kehren die Elektronen nicht um, sondern gelangen zur Folie, auf der sie die positiven Ladungen neutralisieren.

Die Elektronen, die nicht auf die Folie gelangen, fallen auf den Sekundärelektronenvervielfacher (10) (das ist eine Anordnung, in der ein auftretendes Elektron mehrere Elektronen auslöst). Ein hoher Elektronenstrom am Ausgang von (10) bedeutet also, daß der gerade abgetastete Punkt einem dunklen Punkt des Gegenstands entspricht. Die Empfindlichkeit eines Orthikons ist etwa 60mal größer als die eines Ikonoskops. Zum Aufbau und zur Arbeitsweise des Vidikons siehe [44].

Auch von den unter 2. genannten Informationswandlern sollen nur einige näher be-

trachtet werden, nämlich die, die in den meisten Informationsübertragungssystemen Verwendung finden.

Als erstes sollen Geräte beschrieben werden, mit deren Hilfe Informationen hörbar gemacht werden können.

Schallsender (elektro-akustische Informationswandler).

Kopfhörer:

Die Lautstärke dieser Informationswandler ist, wie der Name bereits andeutet, so gering, daß mit ihnen im allgemeinen nur dann gehört werden kann, wenn der Hörer sich in unmittelbarer Nähe des Ohrs befindet.

In den meisten Kopfhörern wird ein elektromagnetisches System verwendet. Ein Dauermagnet von entsprechender Form trägt zwei Spulen, die von der Wechselspannung durchflossen werden. Das sich dadurch ändernde Magnetfeld bewirkt die Bewegung der Membran (die aus Eisenblech besteht). Hörer dieser Art haben wegen der guten Empfindlichkeit trotz stärkerer Verzerrungen weite Verbreitung gefunden.

Hörer, die den piezoelektrischen Effekt ausnutzen, haben nur geringe praktische Bedeutung. Hörer auf elektrodynamischer und elektrostatischer Grundlage sind nicht so empfindlich wie elektromagnetische Hörer, haben aber bessere Eigenschaften, weil

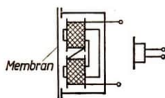


Bild 7.143.
Prinzip und Schaltzeichen des Kopfhörers

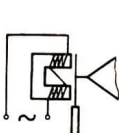


elektromagnetisch

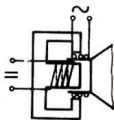
elektrodynamisch

elektrostatisch

piezoelektrisch



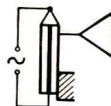
billigster Lautsprecher, starke Verzerrungen



allgemein verwendet, bei tieferen Tönen kaum Verzerrungen; auch bei großer Lautstärke



Hochtonlautsprecher



Hochtonlautsprecher

Übersicht 7.144. Lautsprechersysteme

die übertragene Information durch sie kaum verzerrt wird.

Lautsprecher:

Übersicht 7.144. gibt einen Überblick über die meistens verwendeten Lautsprechersysteme. Außer dem System ist die Membran (meist trichterförmig) für die Qualität und die Lautstärke der übertragenen Information von Bedeutung. In modernen Anlagen werden verschiedene Lautsprecher kombiniert, so daß alle Töne nahezu verzerrungsfrei und gleich leistungsstark übertragen werden.

Ein moderner Lautsprecher, der höhere Ansprüche befriedigt, besteht meist aus der Kombination eines Tiefton- und eines Hochtonlautsprechers, oder er enthält eine speziell geformte Membran, so daß ein breites Frequenzband gut übertragen werden kann (Breitbandlautsprecher).



Bild 7.145.

Schaltzeichen für einen Lautsprecher

Eine weitere wichtige Wandlergruppe sind die elektro-optischen Informationswandler. **Elektronenstrahlröhren.** Elektronenstrahlröhren werden in der modernen Technik

sehr vielseitig verwendet. Man unterscheidet zwischen Bildröhren (Fernsehbildröhren) und Oszillographenröhren, die im Prinzip gleichartig funktionieren. Ihr Unterschied besteht, abgesehen von Größe, Leuchtfarbe und Verwendungszweck, in der Art, wie der Elektronenstrahl gebündelt und gesteuert wird. Deshalb sollen hier zunächst die Gemeinsamkeiten kurz beschrieben werden.

Glühende Metalle geben Elektronen ab (emittieren). Diese Emission kann man dadurch erhöhen, indem man den glühenden Metalldraht (elektrisch aufgeheizt) mit einem Mantel aus speziellen Metalloxiden umgibt. Derartige Metalloxide geben bereits bei niedrigeren Temperaturen mehr Elektronen ab als ein hellglühender Metalldraht.

Stellt man einer solchen Elektronenquelle gegenüber eine Platte auf, die bezüglich der Elektronenquelle (Katode) ein positives Potential hat, so bewegen sich die Elektronen auf die positive Platte (Anode) zu, und zwischen Katode und Anode fließt ein Strom. Bringt man zwischen Katode und Anode ein Metallnetz oder eine Metallplatte (Gitter), der man gegenüber der Katode ein negatives Potential gibt, so wird der Elektronenstrom (wenn es keinen anderen Weg



als durch Öffnungen in dem abschirmenden Metall gibt) unterbrochen.

Der Elektronenstrom tritt aber nur dann auf, wenn sich das System Anode-Katode im Hochvakuum befindet, da die Gasmoleküle die sich bewegenden Elektronen bremsen würden. Durch ein hohes Spannungsgefälle kann man aber die Elektronen so beschleunigen, daß sie trotz der Gasmoleküle zur Anode gelangen. Bei ihrem Weg von der Katode zur Anode würden die Elektronen jedoch mit Gasmolekülen zusammenprallen, diese ionisieren, und eine Lichtbogenentladung wäre die Folge. Eine Lichtbogenentladung ist aber unerwünscht, weil sie zu einer Zerstörung der Elektroden führt und nicht gesteuert werden kann. Deshalb wird das System in Glasgefäße (Röhrenkolben) eingeschmolzen. Gasreste, die trotz der Verdünnung Gasentladungen verursachen würden (technisch werden solche Gasentladungen in Stromtoren oder Thyratrons ausgenutzt, da der Einsatz der Entladungen durch das Gitter gesteuert werden kann), bindet man durch Gettern (Verdampfen spezieller Metalle).

In den Elektronenstrahlröhren wird der Heizdraht mit der Oxidkatode von einem Metallzylinder (Wehneltzylinder) umschlossen (Bild 7.146.). Die Anode liegt auf sehr hohem positivem Potential (0,5 bis 10 kV) und hat entweder Zylinder- oder Blendenform. Wenn der Wehneltzylinder (spezielle Form des Gitters) kein negatives Potential bezüglich der Katode hat, tritt hinter ihm ein Elektronenstrahl aus, sobald an der Anode Spannung liegt. Die Stärke dieses Strahls kann durch die Spannung am Wehneltzylinder gesteuert werden. Bringt man auf den Glaskolben an entsprechender Stelle eine Schicht, die beim Auftreffen von

Elektronen aufleuchtet (Leuchtschirm), so wird der Punkt sichtbar, in dem der Elektronenstrahl auf den Leuchtschirm trifft. Über den Wehneltzylinder kann also die Helligkeit des leuchtenden Punkts gesteuert werden. Um einen möglichst scharfen Punkt zu erhalten, wird der Strahl mit Hilfe eines besonderen Systems gebündelt. Hier muß nun begonnen werden, zwischen Bild- und Oszillographenröhren zu unterscheiden.

Oszillographenröhren:

Die Bündelung und Steuerung erfolgt hier im allgemeinen auf elektrostatischem Wege durch speziell ausgebildete Anoden und Schirmgitter, welche durch ein Paar kurzer Zylinderelektroden gebildet werden. Mittels geeigneter (veränderlicher) Spannungen bilden sie eine elektrostatische Linse für den Elektronenstrahl (Bild 7.147.).

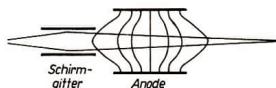


Bild 7.147. Prinzip einer elektrostatischen Linse

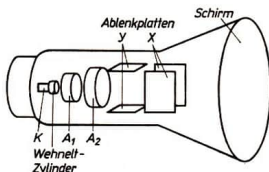


Bild 7.148. Schematische Darstellung einer Oszillographenröhre

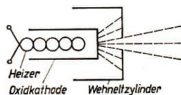


Bild 7.146. Heizung, Katode und Wehneltzylinder in schematischer Darstellung

Die Ablenkung erfolgt meist mit Hilfe zweier Plattenpaare, die rechtwinklig zueinander stehen (Bild 7.148.). Legt man an ein Plattenpaar eine Spannung, so wird der Elektronenstrahl zur positiven Platte hin abgelenkt. (In der Nähe des Leuchtschirms ist der Glaskolben mit Graphit beschichtet. Diese Schicht hat ein hohes po-



sitives Potential (1 bis 10 kV) und bewirkt eine Nachbeschleunigung der Elektronen.) Liegt eine Wechsellspannung an einem Plattenpaar (z. B. an den y-Platten), so entsteht auf dem Leuchtschirm ein Strich, dessen Länge dem doppelten Maximalwert der Spannung entspricht. Legt man an das andere Plattenpaar (x) eine Spannung mit sägezahnförmigem Kurvenverlauf (Kippspannung, Bild 7.149.), so wird dieser Strich zur Sinuswelle auseinandergezogen.



Bild 7.149. U-t-Diagramm einer Kippspannung

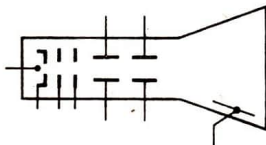


Bild 7.150. Oszillographenröhre und ihr Schaltzeichen

Je nach dem Verwendungszweck werden Oszillographenröhren mit verschiedener Leuchtschirmfarbe (z. B. blau für fotografische Registrierung) und mit unterschiedlichen Leuchtzeiten hergestellt. Durch geeignete Maßnahmen kann man den Elektronenstrahl einen Zylindermantel beschreiben lassen. Ordnet man hinter dem dazu erforderlichen System ein Plattenpaar besonderer Form an (eine Platte wird durch einen Draht, die andere durch einen Hohlzylinder gebildet), so erhält man eine Röhre, deren Bilder einer Darstellung in Polarkoordinaten entsprechen.

Bildröhren:

Bei Bildröhren erfolgt die Fokussierung des Elektronenstrahls meist elektrostatisch, die Ablenkung dagegen magnetisch. Die Ablenkspulen (sie werden meistens zu Ablenkeinheiten zusammengefaßt) werden von außen auf das Rohr geschoben. Der Leucht-

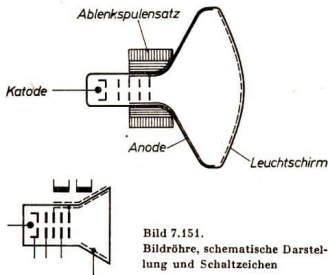


Bild 7.151.
Bildröhre, schematische Darstellung und Schaltzeichen

schirm ist gegenüber den Oszillographenröhren sehr groß gehalten und von angenähert rechteckiger Form. Bei üblicher Ablenkung erhalten die Röhren dadurch eine große Länge.

Um die Länge der Röhren zu verkürzen, vergrößerte man den Ablenkwinkel (z. Z. 1,92 rad).

7.3.2. Verstärker

Geräte zur Verstärkung von Informationen, die als Spannungs- oder Stromänderungen vorliegen, enthalten als verstärkendes Element im allgemeinen Hochvakuumröhren oder Transistoren (in der Steuerungs- und Regelungstechnik werden zur Informationsverstärkung auch Magnetverstärker und Gasentladungsröhren verwendet). In Fernmeldeanlagen dienen auch Relais zur Verstärkung.

Relais. Die Wirkung eines Relais beruht auf folgendem: Der Steuerstrom durchfließt eine auf einem Eisenkern aufgebrachte Wicklung. Der Fluß wirkt über den Anker auf federnd befestigte Kontakte, die einen oder mehrere Stromkreise schalten. Kontakte, die durch Anziehen des Ankers geöffnet werden, heißen Ruhestromkontakte, die, die geschlossen werden, nennt man Arbeitskontakte (Bild 7.152.).

Die Anzahl der Kontakte ist bei den verschiedenen Relaisarten unterschiedlich. (Es gibt Relais mit mehr als acht Arbeits-

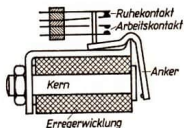


Bild 7.152. Relais, schematische Darstellung

kontakten.) Derartige Relais können nur durch Gleichstrom gesteuert werden. Für die Verwendung von Wechselstrom wurden spezielle Relais (Phasenrelais) entwickelt. Bild 7.153. zeigt den Aufbau eines Phasenrelais. Durch die Kondensatoren wird eine Phasenverschiebung zwischen den Strömen und damit zwischen den Flüssen derart erreicht, daß die von den Flüssen gemeinsam erzeugte Kraft ($F \sim \Phi^2$) konstant ist.

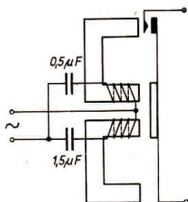


Bild 7.153. Schematische Darstellung eines Phasenrelais

Magnetisiert man durch einen Permanentmagneten (Φ_H) ein Relais vor, so wird zwischen Plus- und Minusstrom unterschieden (Nutzfluß Φ_N). Je nachdem wie der Strom fließt, schlägt das Relais nach links oder rechts aus (polarisiertes Relais, Bild 7.154.).

Durch einen Kupfermantel oder eine kurzgeschlossene zweite Wicklung kann man eine Verzögerung des Anzugs (Bild 7.155.) und Abfalls (Bild 7.155.) erzielen. Einen gleichfalls verzögerten Anzug kann man durch einen parallelgeschalteten Kondensator erreichen, der sich, bevor das Relais anzieht, erst aufladen muß.

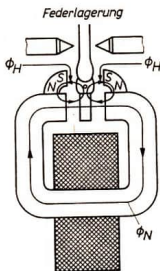


Bild 7.154. Schematische Darstellung eines polarisierten Relais



Bild 7.155. Schaltzeichen eines Relais: mit verzögertem Anzug und mit verzögertem Abfall

Verstärkung durch Relaiserschaltung:

In Bild 7.156. ist das Prinzip der Schaltung eines Morsetelegraphen dargestellt. Der zu übertragende Impuls wird durch den Widerstand der Leitung geschwächt und verzerrt. Zur Verstärkung und gleichzeitigen Neuformung des Signals schaltet man dort ein Relais ein, wo der Impuls gerade noch ausreicht, den Anker eines Relais anzuziehen. Der im Arbeitskreis erzeugte Impuls hat wieder seine ursprüngliche Form und Höhe. Im allgemeinen werden Verstärker mit Hochvakuumröhren oder Transistoren aufgebaut. Bevor hier einige Verstärkerschaltungen und -arten näher betrachtet werden, sollen diese Bauelemente und ihre Arbeitsweise kurz beschrieben werden.

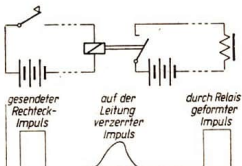


Bild 7.156. Relais als Verstärker



Elektronenröhren. Das Bau- und Funktionsprinzip von Elektronenröhren wurde bereits bei der Behandlung der Elektronenstrahlröhren geschildert. In einem evakuierten Glaskolben befinden sich eine Katode (meist Oxidkatode, direkt oder indirekt beheizt) und eine Anode. Zwischen Anode und Katode befindet sich das Steuergitter, das in seiner Funktion dem *Wehneltzylinder* der Elektronenstrahlröhre entspricht, jedoch aus einer Drahtwendel besteht (Bild 7.157.).

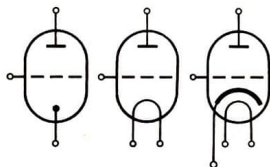


Bild 7.157. Schaltzeichen von Trioden: allgemein, direkt beheizt und indirekt beheizt

Die Katode emittiert Elektronen, die die Katode als Elektronenwolke umgeben. Liegt an der Anode ein positives Potential (Anodenspannung), so fließt, wenn nicht das Gitter stark negativ vorgespannt ist, ein Elektronenstrom.

Liegt neben einer geringen negativen Vorspannung am Gitter eine Wechsellspannung, so ändert sich bei geeigneter Gittervorspannung der Elektronenstrom (Anodenstrom) im Rhythmus der Wechsellspannung. Der Anodenstrom kann also durch das Gitterleistungslos gesteuert werden. (Allerdings wird dabei vorausgesetzt, daß kein Gitterstrom fließt. Diesen Zustand kann man durch geeignete Spannungen und hohe Widerstände im Gitterkreis einstellen.) Da diese Röhre, abgesehen von den Heizanschlüssen, nur drei Elektroden hat, heißt sie Triode. Stellt man den Katodenstrom I_k (er setzt sich aus dem Gitterstrom I_g und dem Anodenstrom I_a zusammen, im Nennbetrieb gilt wegen $I_g = 0$; $I_k = I_a$) und den Anodenstrom I_a in Abhängigkeit von der Gittervorspannung U_g bzw. der Anodenspan-

nung U_a dar, so erhält man die Kennlinienfelder der Triode (Bilder 7.158. und 7.159.). Eine Triode wird durch die folgenden Größen charakterisiert:

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right); \quad U_g = \text{konst.};$$

Durchgriff:

$$D = - \left(\frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \right) \cdot 100\%; \quad I_a = \text{konst.}$$

(Für eine Verstärkerschaltung mit einer Triode gilt für den Verstärkungsfaktor $v = \frac{1}{D}$);

Steilheit:

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \right); \quad U_a = \text{konst.}$$

Alle drei Größen sind durch die *Barkhausen-*sche Röhrgleichung

$$D \cdot S \cdot R_i = 1$$

verknüpft.

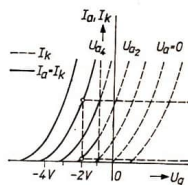


Bild 7.158. Kennlinienfeld einer Triode

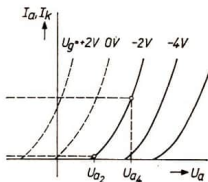
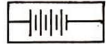


Bild 7.159. Kennlinienfeld einer Triode



Trioden haben verschiedene Eigenschaften, die sich für manche Zwecke negativ auswirken:

1. Je stärker eine Röhre angesteuert werden soll (hohe Verstärkung), desto negativer muß das Gitter vorgespannt werden. Dazu gehört bei gleichbleibendem Durchgriff (D soll sogar möglichst klein werden, um einen hohen Verstärkungsgrad zu erhalten) eine noch höhere Anodenspannung, die mit weiterem Aufwand verbunden ist (siehe Kennlinienfeld);
2. Trioden haben einen kleinen Innenwiderstand (um 10 k Ω). Dieser kleine Innenwiderstand dämpft die Glieder (z. B. Schwingkreise), mit denen die Triode gekoppelt ist;
3. die Kapazität zwischen Anode und Gitter macht sich bei der Verstärkung hochfrequenter Spannungen unangenehm bemerkbar (es kann zur Selbsterregung der Röhre kommen).

Aus diesem Grunde werden viele Röhrentypen mit mehreren Gittern ausgestattet. Tetrode (Bild 7.160.): Zwischen Anode und Steuergitter befindet sich ein weiteres Gitter (Schirm- oder Schutzgitter), das eine konstante positive Vorspannung erhält und bewirkt, daß die Höhe der Anodenspannung praktisch keinen Einfluß mehr auf die Größe des Katodenstroms hat. Wechselstrommäßig liegt das Schirmgitter über einem Kondensator an Erde. Nachteile 1 und 3 der Triode werden durch Einführen dieses Gitters vermieden.

Pentode (Bild 7.160.): Zwischen Anode und Schirmgitter einer Tetrode befindet sich ein

weiteres Gitter, das gewöhnlich auf Katodenpotential liegt und bewirkt, daß die aus Schirmgitter und Anode herausgelösten Sekundärelektronen (erzeugt durch Aufprall der Elektronen aus der Katode) gebremst werden und zu ihrer Ausgangselektrode zurückkehren. Daher heißt dieses Gitter Bremsgitter. Bild 7.161. zeigt das Kennlinienfeld einer Pentode. Die Schirmgitterspannung U_s ist konstant gehalten worden; die Anodenspannung U_a hat auf den Strom keinen Einfluß mehr, folglich ist nur noch eine I_a - U_a -Kennlinie vorhanden. Der Innenwiderstand einer Pentode ist wesentlich größer als der einer Triode, der Durchgriff D ist gegenüber dem der Triode sehr klein. Damit sind die Nachteile 1 und 2 der Triode beseitigt.

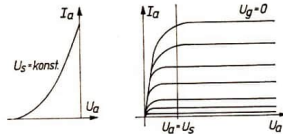


Bild 7.161. Kennlinienfeld einer Pentode

Hexode (Bild 7.160.): Das Bremsgitter wird zu einem zweiten Steuergitter, zwischen Anode und zweitem Steuergitter wird ein weiteres Schirmgitter eingefügt. Die Hexode kann außer zur Verstärkung noch zur Produktbildung zweier Spannungen und zum Modulieren verwendet werden.

Neben den genannten Mehrgitterröhren gibt es weitere Röhren mit noch mehr Gittern (Oktode, Enneode, Anzeigeröhren), die spezielleren Zwecken dienen. Heute werden in einem Glaskolben oft zwei oder gar drei Röhrensysteme untergebracht.

Die Röhrendaten (z. B. U_g , U_a , U_s , $I_{a\max}$) werden vom Röhrenhersteller angegeben und sind in Röhrentaschenbüchern zusammengefaßt. Nach dem internationalen Röhrenschlüssel erhalten die Röhren Typenbezeichnungen, aus denen gewisse Daten unmittelbar hervorgehen. So bedeutet z. B. die Bezeichnung EF 83:

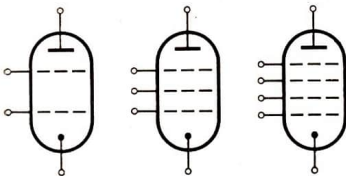


Bild 7.160. Schaltzeichen einer Tetrode, Pentode und Hexode



E 6,3 V Allstromheizung, F Pentode, 83 Novalsockel (9 Stifte auf einem Teilkreis von 11,9 mm Durchmesser). Die Verwendung immer höherer Frequenzen als Träger von Informationen macht es erforderlich, den Abstand der Elektroden von Trioden (andere Elektronenröhren werden im Bereich höchster Frequenzen nicht verwendet) zu verringern, weil sich sonst die Laufzeit der Elektronen bemerkbar macht. Als neue Bauformen mit geringen Elektrodenabständen haben sich Scheibentrioden (die äußeren Anschlüsse haben Scheibenform, Bild 7.162. links), Lighthouse-Röhren (Bild 7.162. rechts) und Bleistift-Röhren (pencil tubes, Bild 7.162. unten) bewährt. In einer anderen Gruppe von Röhren für höchste Frequenzen wird der Laufzeiteffekt der Elektronen gerade ausgenutzt (Laufzeitröhren). Zu diesem Gebiet siehe auch [33], [35].

Transistoren. Transistoren sind in neuerer Zeit vielfach an die Stelle von Elektronenröhren getreten, ohne die Röhre allerdings zu verdrängen.

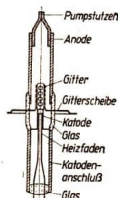
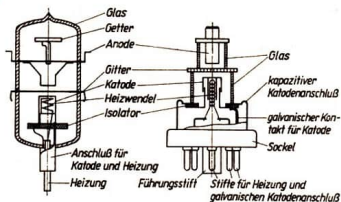


Bild 7.162.

Moderne Trioden für HöF-Technik: Scheibentriode; Lighthouse-Triode und Bleistift-Triode

Transistoren werden aus Halbleitermaterial (Germanium, Silizium) von höchster Reinheit hergestellt. Sind alle Valenzen der Halbleiteratome, z. B. der Germaniumatome, abgesättigt (bei tiefen Temperaturen ist das der Fall), so ist das Material trotz Wirkung eines elektrischen Feldes nichtleitend (Bild 7.163.). Bei höheren Temperaturen lösen sich als Folge der thermischen Bewegung der Atome einige Bindungselektronen ab. Der Halbleiter wird elektronenleitend. Ein fehlendes Elektron wird unter Wirkung eines elektrischen Feldes durch ein anderes ersetzt, die Bindungslücke (Loch) wandert. Die freien Elektronen wandern entgegen der Feldrichtung ab. Die Bindungslücken werden durch andere Elektronen aufgefüllt, die Bindungslücke wandert also in Richtung des Feldes. Die Leitung (Eigenleitung) beim Halbleiter erfolgt also durch Elektronen und durch Löcher (Defektelektronen; Bild 7.164.).

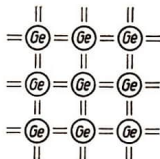


Bild 7.163.
Struktur von Germanium als Nichtleiter

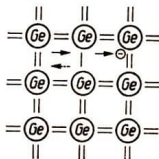


Bild 7.164.
Struktur von eigenleitendem Germanium

Das sehr reine Germanium oder Silizium wird mit kleinsten Dosen Antimon, Arsen oder Phosphor (5wertig) bzw. Indium, Gallium, Aluminium oder Bor (3wertig) künstlich verunreinigt (gedopt). Ein Sb-Atom bzw. ein In-Atom im Ge-Verband reagiert wie folgt:



Das Sb-Atom enthält ein nichtabgesättigtes Valenzelektron, durch Dopung mit Sb-Atomen (Donator) wird also die Elektronenleitfähigkeit gegenüber der Lochleitfähigkeit erhöht. Derartige Halbleitermaterial nennt man vom Typ n (Bild 7.165.). Dem In-Atom fehlt im Ge-Verband ein Elektron zur Absättigung der Valenzen, also entsteht durch das In-Atom ein Loch, die Lochleitfähigkeit wird durch dopen mit Indium (Akzeptor) erhöht. Halbleitermaterial mit erhöhter Lochleitfähigkeit heißt vom Typ p (Bild 7.166.). Die eingelagerten Fremdatome schaffen im Kristallgitter sogenannte Störstellen.

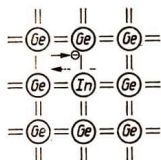


Bild 7.165.
Struktur von n-Germanium

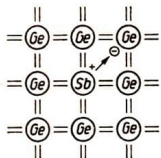


Bild 7.166.
Struktur von p-Germanium

Im Prinzip setzt sich ein Transistor aus drei Schichten gedopten Halbleitermaterials zusammen. Die beiden äußeren Schichten sind aus Material vom gleichen Typ: Die mittlere Schicht aus Halbleitersubstanz vom entgegengesetzten Typ wird sehr dünn gehalten ($< 0,1 \text{ mm}$). Demnach unterscheidet man zwischen pnp-Transistoren und npn-Transistoren. Nach der technischen Realisierung unterscheidet man Flächentransistoren (Bild 7.167.) und Spitzentransistoren (Bild 7.168.).

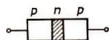


Bild 7.167.
Schema des Aufbaus eines Flächentransistors



Bild 7.168.
Schema des Aufbaus eines Spitzentransistors

Nach der unterschiedlichen Technologie unterscheidet man Flächentransistoren in

1. Wachstumstransistoren;
2. Legierungstransistoren;
3. Diffusionstransistoren (Drifttransistoren);
4. Mesatransistoren (Bild 7.169.).

Ein Ge-Legierungstransistor vom pnp-Typ wird aus einem Kristallplättchen aus n-Germanium durch beidseitiges Einlegieren kleiner Kügelchen aus Akzeptorsubstanz (z. B. In) hergestellt.

Ein Si-Diffusionstransistor vom pnp-Typ wird aus einem p-leitenden Si-Einkristallplättchen gewonnen, indem man das Plättchen bei bestimmter Temperatur einer

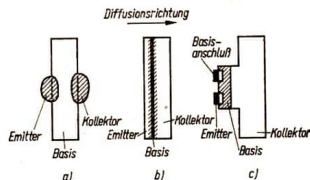


Bild 7.169. Schematische Darstellungen von
a) Legierungstransistor, b) Diffusionstransistor und
c) Mesatransistor

Atmosphäre aus Donator- und Akzeptorsubstanz aussetzt. Die Atome diffundieren mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in den Kristall hinein und erzeugen so die gewünschte Störstellenverteilung.

Spitzentransistoren entstehen aus n-Ge, auf das in möglichst kleinem Abstand feine Spitzen aus Indium aufgesetzt werden. Durch einen kurzen Stromstoß wird der Transistor formiert.

Die mittlere Zone eines Transistors heißt Basis, die Zone, die Ladungsträger abgibt, Emitter, die dritte nennt man Kollektor.

Im pnp-Transistor fließt im wesentlichen ein Löcherstrom, im npn-Transistor da-



gegen ein Elektronenstrom. Die Löcher aus dem Emittor E (Bild 7.171.) gelangen unter dem Einfluß der Basisspannung U_{BE} durch die Sperrschicht zwischen p-Ge und n-Ge (kurz Sperrschicht pn) in die Basis B. Von dort werden sie fast alle unter dem Einfluß der relativ großen Kollektorspannung U_{CE} durch die Sperrschicht np in den Kollektor gesaugt, wo sie durch die Elektronen des Kollektorstroms I_C neutralisiert werden. Nur ein geringer Teil des Löcherstroms fließt als Basisstrom I_B ab. Die Größe von I_B wird durch die an der Basis liegende Spannung bestimmt. Wird neben der Vorspannung U_B noch eine Wechselspannung an die Basis gelegt, so ändert sich I_B und damit auch $I_B + I_C = I_E$ und wegen $I_E = \text{konst.}$ ebenfalls I_C im Rhythmus der angelegten Wechselspannung. Die Steuerung eines Transistors erfolgt, im Gegensatz zur Elektronenröhre, nicht leistungslos.

Verstärker mit Röhren und Transistoren. Da, abgesehen von einigen Unterschieden, zwischen Elektronenröhre und Transistor eine weitgehende Analogie besteht, soll über Verstärker mit diesen Bauelementen ein kurzer Überblick gemeinsam gegeben werden. Man unterscheidet je nach dem Verstär-

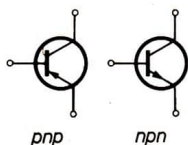


Bild 7.170. Schaltzeichen für Transistoren: pnp-Transistor und npn-Transistor

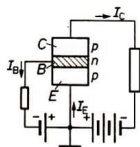


Bild 7.171. Grundschaltung eines Transistors als Verstärker

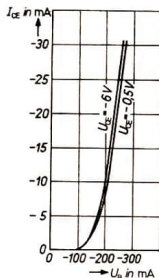


Bild 7.172. Kennlinienfeld eines Transistors

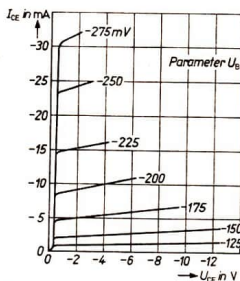


Bild 7.173. Kennlinienfeld eines Transistors

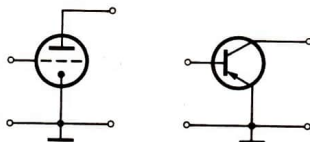


Bild 7.174. Katodenbasis- bzw. Emitterschaltung

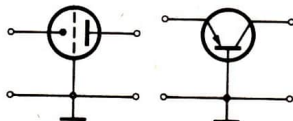


Bild 7.175. Gitter- bzw. Basisschaltung

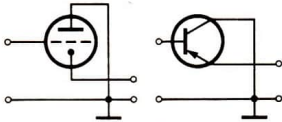


Bild 7.176. Anoden- bzw. Kollektor-Schaltung

kungsziel Vorverstärker und Leistungsverstärker. Mit Vorverstärkern versucht man eine möglichst hohe Verstärkung zu erreichen. Verstärker, die eine möglichst große Leistung bei kleinem Innenwiderstand abgeben, heißen Leistungsverstärker. Für die Qualität eines Leistungsverstärkers ist der Verstärkungsgrad nebensächlich, angestrebt wird ein maximaler Wirkungsgrad. Die Verstärkung jedes der genannten Verstärker beruht auf dem Verstärkungseffekt von Elektronenröhren bzw. Transistoren.

Vorverstärker:

Man unterscheidet nach der Breite des verstärkten Frequenzbandes: Breitband- und Selektivverstärker.

Ein *Breitbandverstärker* hat eine große Durchlaßbreite. Das Frequenzband, was verstärkt werden kann, wird durch die untere und die obere Grenzfrequenz (f_u und f_o) begrenzt. Das Verhältnis $f_u:f_o$ liegt bei Breitbandverstärkern je nach Anforderung

um 1:50 bis 1:1000 (Beispiel: NF-Verstärker $f_u = 100$ Hz, $f_o = 10$ kHz).

Die einzelnen Verstärkerstufen (Röhren oder Transistoren) werden durch Koppelvierpole verbunden. Die Art des Koppelvierecks ist für die Eigenschaften des Verstärkers bestimmend. Folgende Koppelungsarten werden für Breitbandverstärker verwendet:

1. *R-C-Kopplung* (Bild 7.177.);
2. *Drosselkopplung* (Bild 7.178.);
3. *Transformatorkopplung* (Bild 7.179.).

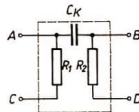


Bild 7.177.
R-C-Kopplung

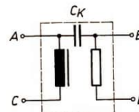


Bild 7.178.
Drosselkopplung

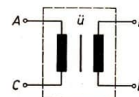


Bild 7.179.
Transformatorkopplung

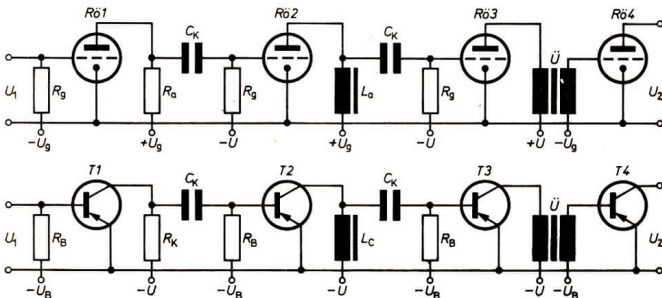


Bild 7.180. *R-C-, Drossel- und Transformatorverstärker mit Röhren und Transistoren*



Die Drosselkopplung stellt hinsichtlich ihrer Wirkung eine Abwandlung der Transformatorkopplung dar. Sie wird kaum noch eingesetzt.

Bei allen Kopplungsarten (außer Gleichspannungsverstärkern) wird die gleichstrommäßige Trennung und die wechselstrommäßige Verkopplung beider Verstärkerstufen angestrebt.

Um im folgenden nicht ständig zwischen den Bezeichnungen bei Röhren- bzw. Transistorschaltungen (z. B. Anodenstrom, Kollektorstrom) unterscheiden zu müssen, wird am Bild 7.180. die fast vollkommene Analogie zwischen Röhren- und Transistorverstärkern gezeigt. (Dieses Bild stellt keine reale Schaltung dar, sondern soll nur auf die weitgehende Analogie verweisen.)

Im folgenden werden die Bezeichnungen für Röhrenschaltungen verwendet.

Beim $R-C$ -Verstärker wird über dem Widerstand R_a durch den Anodenstrom ein Wechselspannungsabfall erzeugt, der der Wechselspannung am Gitter von Röhre 1 entspricht. Dieser Wechselspannungsabfall wird über den Koppelkondensator C_k auf das Gitter von Röhre 2 übertragen.

Der innere Widerstand von Röhre 1, R_a , C_k , R_g und C_g (Gitter-Katoden-Kapazität von Röhre 2) bestimmen das Verstärkerverhalten bezüglich der Frequenz der zu verstärkenden Größe. Bild 7.181. zeigt den Verlauf von $v = g(f)$. Es ist möglich, den Verstärkungsgrad sowie die Phasenlage genau zu ermitteln. In diesem Rahmen würde das jedoch zu weit führen. Der $R-C$ -Verstärker wird meistens verwendet, weil er bei geringem Aufwand gute Eigenschaften zeigt. Beim Drosselverstärker tritt bei bestimmter Frequenz Resonanz auf, da die Induktivität mit den Kapazitäten (C_k und Schaltkapazitäten) einen Resonanzkreis bildet. Durch die parallel liegenden Widerstände R_i und R_g wird dieser Kreis stark bedämpft. Bei sehr großem Röhreninnenwiderstand (z. B. Pentode) kommt es jedoch zum Resonanzfall, der Breitbandverstärker wird zum Resonanzverstärker.

Beim Transformatorverstärker werden beide

Röhren galvanisch getrennt. Dadurch wird die Anodengleichspannung von Röhre 3 vom Gitter der Röhre 4 ferngehalten. Nach der Lage des Transformators unterscheidet man Eingangstransformator, Zwischentransformator (Bild 7.180.) und Ausgangstransformator. Hier soll nur der Zwischentransformator betrachtet werden. Der Vorteil dieses Verstärkers gegenüber dem $R-C$ -Verstärker liegt offensichtlich in der größeren Leerlaufverstärkung durch das Übersetzungsverhältnis \bar{u} . Nachteilig ist aber, daß der Transformatorverstärker nur ein relativ schmales Frequenzband übertragen kann, da die Wicklungen (Induktivitäten) und die Kapazitäten (die von der Sekundärseite auf die Primärseite \bar{u}^2 -fach übertragen werden) eine echte Breitbandverstärkung verhindern. Als Zwischenverstärker mit Breitbandcharakteristik ist der Transformatorverstärker heute ohne Bedeutung, da der teure Aufbau den erreichten Effekt im allgemeinen nicht lohnt. Zur Anpassung von Widerständen an den Ein- oder Ausgang von Verstärkern hat der Transformator jedoch große Bedeutung (Bild 7.182.).

Der *Selektivverstärker* soll nur ein schmales Frequenzband übertragen. Er wird also überwiegend als Hochfrequenzverstärker eingesetzt. Als Außenwiderstand dient ein

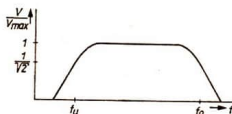


Bild 7.181. Frequenzgang eines $R-C$ -Verstärkers

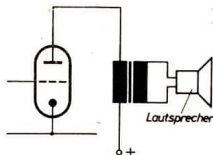


Bild 7.182. Anpassungstransformator in der Endstufe eines NF-Verstärkers



fest abgestimmter oder ein abstimbarer Parallelresonanzkreis.

Nach der Art der Kopplung unterscheidet man Sperrkreiskopplung (Bild 7.183.) und Bandfilterkopplung (Bild 7.184.).

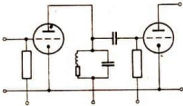


Bild 7.183.
Sperrkreiskopplung

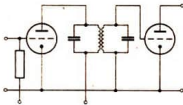


Bild 7.184.
Bandfilterkopplung

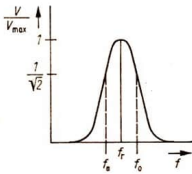


Bild 7.185.
Frequenzgang eines
Verstärkers mit
Sperrkreiskopplung

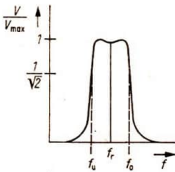


Bild 7.186.
Frequenzgang eines
Verstärkers mit
Bandfilterkopplung

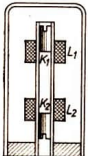


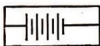
Bild 7.187.
Schnitt durch einen
Bandfilter

Bei der Sperrkreiskopplung wird die durch den Sperrkreis festgelegte Frequenz besonders verstärkt. Bild 7.185. zeigt den Verlauf von $v = g(f)$. Diese Kopplung hat aber gewisse Nachteile, weil bei einer hohen, schmalen Kurve (hohe Kreisgüte) nur eine Frequenz, die Resonanzfrequenz, richtig verstärkt wird. Beim Rundfunkempfang enthalten die von der Antenne des Empfängers aufgenommenen Frequenzen neben dem eigentlichen Träger Seitenfrequenzen, die ebenfalls gleichmäßig mit verstärkt werden müssen, wenn ein einwandfreier Empfang gewünscht wird. Ideal wäre es, wenn der Koppelvierpol einen Frequenzgang hätte, der einer Rechteckkurve entspricht, denn ein Verstärker mit diesen Eigenschaften würde den Träger und die Seitenbänder (siehe Seite 279 ff.) stark und gleichmäßig verstärken, alle anderen Frequenzen jedoch nicht. Die Bandfilterkopplung kommt dieser Forderung recht nahe. Ihr Frequenzgang $v = g(f)$ ist in Bild 7.186. dargestellt. Bandfilter müssen, um eine derartige *Bandfilterkurve* zu erzielen, entsprechend abgestimmt werden. Mit verstimmtten Bandfiltern läßt sich unter besonderen Bedingungen auch eine Breitbandverstärkung erzielen (Fernsehtechnik).

Leistungsverstärker:

Leistungsverstärker werden z. B. in Endstufen von Empfängern, Sendern und Regel- und Steuerungsanlagen verwendet. Betrachtet man die I_a-U_g - bzw. I_c-I_{BE} -Kennlinien einer Röhre bzw. eines Transistors, so wird durch die Wahl der Gittervorspannung bzw. Basisvorspannung ein Arbeitspunkt auf dieser Kennlinie gewählt. Je nach Lage des Arbeitspunktes wird die am Gitter bzw. an der Basis liegende Wechselspannung zwar verstärkt, aber auch teilweise verzerrt. Durch geeignete Schaltungen (Gegentakt-schaltung, Bild 7.188.) kompensieren sich die Verzerrungen.

Im linken Teil des Bildes 7.189. liegt der Arbeitspunkt im geraden Teil der Kennlinie. Verzerrungen treten kaum auf. Verstärker, die in diesem Teil der Kennlinie



arbeiten, heißen A-Verstärker. Im rechten Teil des Bildes 7.189. liegt der Arbeitspunkt im unteren gekrümmten Teil der Kennlinie. Es treten große Verzerrungen auf. Der Verstärker arbeitet im B-Betrieb.

Nach der Lage des Arbeitspunkts unterscheidet man weiter AB- und D-Verstärker. Schließlich kennt man noch C-Verstärker, die mittels eines Parallelschwingkreises im Anodenkreis ein enges Frequenzband verstärken (Senderverstärker).

Endstufen, die in B-, AB- oder D-Betrieb arbeiten, werden als Gegentaktendstufen ausgeführt. Mit Hilfe dieser Schaltung werden die Verzerrungen weitgehend kompensiert. Bild 7.188. zeigt das Schaltbild einer B-Gegentaktendstufe.

Im Bereich höchster Frequenzen werden Verstärker mit modernen Trioden (Scheibentrioden, Bleistifttrioden oder Light-house-Trioden) oder mit Laufzeitröhren (z. B. Klystrons) ausgerüstet, näheres siehe [33], [35].

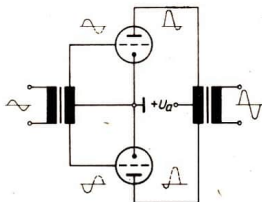


Bild 7.188. Schaltung einer B-Gegentaktendstufe

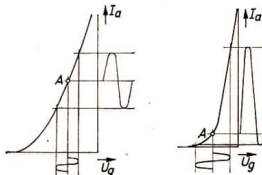


Bild 7.189. Lage des Arbeitspunktes A bei A-Verstärkung und Lage des Arbeitspunktes A bei B-Verstärkung

7.3.3. Schwingungserzeuger

Jedes verstärkende Bauelement kann zur Erzeugung von Schwingungen verwendet werden. Im Prinzip läuft das Erzeugen von Schwingungen auf folgendes hinaus:

Auf den Verstärkereingang wird kurzzeitig ein Impuls oder eine Wechselspannung gegeben. Die verstärkte Spannung wird phasenrichtig auf den Verstärkereingang zurückgekoppelt und dient nun als Eingangssignal. Dieses Zurückführen wird als Rückkopplung bezeichnet.

Erfolgt die Rückkopplung phasenrichtig, d. h., die Ausgangsgröße wirkt wie die Eingangsgröße, so ist die Rückkopplung positiv. Man nennt sie Mitkopplung. Wirkt die Ausgangsgröße der Eingangsgröße entgegen, so heißt die Rückkopplung negativ (Gegenkopplung). Die Gegenkopplung dient unter anderem der Linearisierung von Verstärkern (Verminderung der Verzerrungen als Folge der gekrümmten Kennlinie). Bei positiver Rückkopplung kann es bei zu fester Kopplung zu einer immer stärker werdenden Schwingung kommen, die schließlich zur Zerstörung des Schwingungserzeugers führt. Eine zu starke Gegenkopplung kann zur Vernichtung von Schwingungen oder Informationen führen.

Eine direkte Kopplung des Ausgangs einer Röhre auf ihren Eingang führt zu einer Gegenkopplung, da Eingangs- und Ausgangsspannung gegenphasig sind. Deshalb wird über ein phasendrehendes Glied (Koppelvierpol) zurückgekoppelt ($L, C, C-L$). Bild 7.190. zeigt die sogenannte *Meißner*-Schaltung, bei der der Koppelvierpol ein Transformator ist. Die Induktivität des Übertragers bildet zusammen mit der Kapazität einen Schwingkreis, der die Frequenz der Schwingung bestimmt.

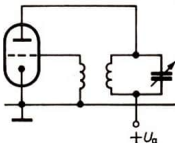


Bild 7.190. Schaltung eines Meißner-Oszillators

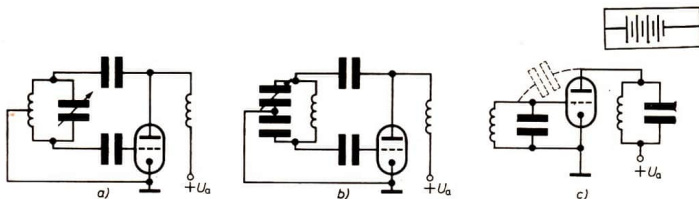


Bild 7.191. a Induktive Dreipunkt-Schaltung; b kapazitive Dreipunktschaltung; c Huth-Kühn-Schaltung

Tonfrequenzgeneratoren arbeiten vielfach nach dem *Meißner*prinzip oder mit Hilfe einer phasendrehenden Kombination. Andere Hochfrequenzgeneratoren, sogenannte Schwebungssummer, enthalten zwei Hochfrequenzgeneratoren, deren Frequenzdifferenz am Ausgang auftritt (ein Generator erzeugt eine feste, der andere eine veränderliche Frequenz).

Hochfrequente Schwingungen werden mit Hilfe einer ganzen Reihe von Schaltungen erzeugt. Bild 7.191. zeigt einige von ihnen. Bei der *Huth-Kühn*-Schaltung erfolgt die Rückkopplung über die Gitter-Anoden-Kapazität der Röhre. Die von den oben genannten Schaltungen erzeugten Schwingungen sind sinusförmig. Problematisch ist bei allen Schwingungserzeugern die Frequenzstabilisierung. Die Frequenz kann sich durch Spannungsänderungen, durch Ändern des Gitterstroms, durch Altern der Röhren u. a. verschieben. Bei allen Sendeanlagen muß aber die Frequenz aus verschiedenen Gründen (z. B. Einhalten des Wellenplans, Vermeiden gegenseitiger Störungen) sehr konstant bleiben. Bei niedrigen Frequenzen kann die Stabilisierung durch mechanische Schwingssysteme (Stimmgabel) erfolgen. Im Bereich höherer Frequenzen wird der piezoelektrische Effekt einiger Salze, z. B. Quarz (vgl. Seite 258, hier jedoch in umgekehrter Richtung) technisch genutzt (Quarzstabilisierung).

Unter Beachtung der Achsen im Kristall wird aus dem meist künstlich gezüchteten Quarzkristall ein dünnes Plättchen herausgeschnitten (ein Plättchen von 1 mm Dicke hat eine Resonanzfrequenz von etwa 2,8 MHz). Dieses Plättchen erhält zwei Elektroden, meist aufgedampfte Silber-

schichten, und wird durch eine Kapsel vor mechanischen Beschädigungen geschützt. Wird nun an einen Schwingquarz eine Wechsellspannung gegeben, so gerät dieser in Schwingungen, die bei seiner Resonanzfrequenz besonders stark werden. Der Schwingquarz verhält sich also wie ein Schwingkreis von hoher Güte (die Güte eines Schwingkreises ist dann besonders hoch, wenn die Resonanzkurve sehr hoch und möglichst schmal ist). Die Resonanzfrequenz ist, abgesehen von den Abmessungen des Schwingquarzes, von der Temperatur abhängig, deshalb wird der Quarz in größeren Sendern in einen Thermostaten eingebaut. Auf diese Weise erreicht man große Frequenzkonstanz ($f = f_r \pm 10^{-8} f_r$).

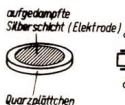


Bild 7.192. Ansicht und Schaltzeichen eines Schwingquarzes

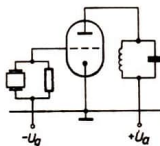


Bild 7.193. Quarzstabilisierte Huth-Kühn-Schaltung

Fast alle genannten schwingfähigen Systeme müssen meist durch weitere Schaltelemente ergänzt werden, die verhindern, daß sich die Amplitude der erzeugten Schwingung ständig vergrößert. Eine derartige Amplitudenbegrenzung kann z. B. durch Änderung der Steilheit der Röhre (Verschieben des Arbeitspunkts) oder da-



durch erfolgen, daß bei zu großer Amplitude die Gitterspannung zeitweilig positiv wird, so daß ein Gitterstrom fließt, der eine Wirklast des Gitterkreises bedeutet.

Auf Seite 273 wurde erwähnt, daß Schwingungen auch mit Hilfe phasendrehender Kombinationen erzeugt werden können. Bild 7.194. zeigt eine R - C -Kombination, die eine Drehung der Phase um $3,14$ rad bewirkt, da jedes einzelne Glied eine Phasendrehung von 262 mrad verursacht.

Bild 7.195. zeigt das Schaltbild eines Tongenerators, der mit Hilfe einer derartigen Phasenkette arbeitet. Durch Amplitudenbegrenzung und Amplitudenstabilisierung erreicht man näherungsweise sinusförmige Schwingungen.

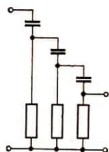


Bild 7.194.
 R - C -Phasen-
kette

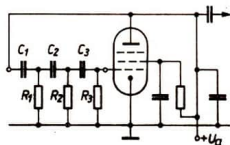


Bild 7.195.
Schaltung eines
 R - C -Generators

In der Elektrotechnik werden aber auch nichtsinusförmige Schwingungen benötigt. Einige häufig gebrauchte lassen sich mit nicht allzu großem Aufwand aus Rechteckschwingungen gewinnen (Sägezahnsschwingungen, Dreieckschwingungen, Folgen sehr kurzer Impulse u. a.).

Zum Erzeugen von Rechteckschwingungen dienen im allgemeinen Multivibratoren. (Nichtsinusförmige Schwingungen können aber auch durch eine Vielzahl anderer Schaltungen erzeugt werden.) Ein Multivibrator besteht im Prinzip aus zwei gegen-

einander rückgekoppelten R - C -Verstärkern, deren Röhren (Hochvakuum- oder gasgefüllte Röhren) oder Transistoren wechselseitig in den stabilen und dynamischen Zustand übergehen (Bild 7.196.). Die Koppellemente der Multivibratoren können symmetrisch oder asymmetrisch aufgebaut sein. Bild 7.197. zeigt die Schwingungsbilder bei a) symmetrischem und b) asymmetrischem Aufbau; der Spannungsverlauf über einem parallelgeschalteten Kondensator C bei symmetrischem Multivibratortyp ist in c) und bei asymmetrischem Aufbau in d) zu sehen. Die Sägezahnsschwingungen (Kippschwingungen, Bild 7.197.d) dienen hauptsächlich zur Steuerung der Ablenkeinrichtungen von Elektronenstrahlröhren.

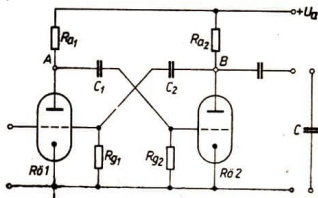


Bild 7.196. Schaltung eines Multivibrators

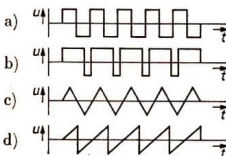


Bild 7.197. Schwingungsbilder am Ausgang eines Multivibrators

Zur Arbeitsweise des Multivibrators:

Es werde angenommen, daß im Augenblick Rö 2 durch eine negative Gittervorspannung (U_{g2}) gesperrt ist. Am Punkt B liegt die volle Anodenspannung U_a . Der Kondensator C_1 entlädt sich über R_{g2} . Die Gitterspannung U_{g2} wird weniger negativ, und Rö 2 wird geöffnet. Der einsetzende Strom



erzeugt einen Spannungsabfall über R_{a2} , dadurch wird die Spannung am Gitter von Rö 1 negativer. Als Folge wird der Strom durch Rö 1 geringer, und damit steigt die Spannung im Punkt A, was den Spannungsanstieg am Gitter von Rö 2 unterstützt. Schließlich ist Rö 1 gesperrt. Nun entlädt sich C_2 über R_{g1} , U_{g2} steigt und überschreitet die Sperrspannung, durch Rö 1 fließt Strom usw.

Spannt man ein Gitter des Multivibrators stark negativ vor, so kann die Schaltung nicht von allein umschalten (kippen). Erst ein ausreichend positiver Impuls öffnet die Röhre mit dem vorgespannten Gitter, der Multivibrator kippt. Dieser Multivibrator hat also einen stabilen Zustand, deshalb heißt er monostabiler Multivibrator oder Univibrator. Mit ihm kann durch einen kurzen Impuls unbestimmter Form und Länge ein einziger durch die Schaltelemente bestimmter Impuls von geforderter Form, Länge und Amplitude erzeugt werden (Impulsformung). Spannt man beide Gitter negativ vor, so erhält man einen bistabilen Multivibrator (oder Flip-Flop-Generator), der in Zählschaltungen und als Speicherelement in Elektronenrechnern eine Rolle spielt. Die Erzeugung von Schwingungen im Bereich höchster Frequenzen geschieht mit Hilfe von Lauffeldröhren (Magnetrons, Schlitzmagnetrons u. a.), hierzu siehe [33].

7.3.4. Modulation — Demodulation

Um Informationen drahtlos übermitteln zu können, mußte man die Informationen einer Trägerschwingung aufprägen (amodulieren), weil z. B. Tonfrequenzen sich nicht drahtlos übertragen lassen. Auch in der drahtgebundenen Informationsübertragungstechnik erkannte man bald den Vorteil einer Übertragung mittels Trägerfrequenz, da eine Leitung viel besser ausgenutzt werden kann (z. B. 200 und mehr Telefongespräche zu gleicher Zeit über eine Leitung). Die drahtgebundene Übertragung von Fernsehendungen innerhalb von Fernsehnetzen (z. B. Intervention) ist auch nur

über Trägerfrequenzen möglich. Nachdem der Träger durch Schwingungserzeuger bereitgestellt worden ist, nachdem Informationswandler die Information so umgeformt haben, daß sie in Form von Spannungs- oder Stromänderungen vorliegt, muß die Information dem Träger aufgemodelt werden.

Modulation. Erfolgt die Übertragung mittels eines ununterbrochen schwingenden Trägers, so unterscheidet man drei Modulationsarten. Den Augenblickswert der Spannung des Trägers kann man mit Hilfe der folgenden Gleichung ermitteln:

$$u(t) = U \cos(\omega t + \varphi^*).$$

Auf Seite 223 wurde für den Momentanwert einer Spannung $u = U_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$ angegeben.

Zur besseren Unterscheidung zur Gleichung auf Seite 223 wird φ^* geschrieben. Der scheinbare Widerspruch zwischen beiden Gleichungen verschwindet, wenn wir $\varphi = \varphi^* + \frac{\pi}{2}$ setzen, denn es gilt $\cos \varphi = \sin(\varphi^* + \frac{\pi}{2})$. Da keine einschränkenden Angaben über φ und φ^* gemacht wurden, können wir ohne Bedenken die für unsere Zwecke brauchbarere Form verwenden.

Betrachtet man diese Gleichung, so gibt es in dieser Gleichung drei Größen, die variabel sein können:

1. die Amplitude U ,
2. die Frequenz ω ,
3. die Phase φ .

Ändert man die Amplitude im Rhythmus der Modulationsfrequenz, so ist das Ergebnis ein amplitudenmodulierter Träger (AM), Frequenz und Phase bleiben dabei unverändert. Ändert man dagegen die Frequenz bei gleichbleibender Amplitude und Phase im Rhythmus der Modulationsfrequenz, so nennt man diese Modulationsart Frequenzmodulation (FM) (Bild 7.198.). Schließlich kann auch die Phase durch die Modulationsfrequenz beeinflusst werden, diese Modula-

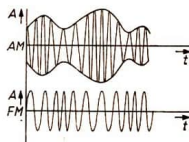
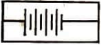


Bild 7.198.
Schwingungsbilder
der Modulations-
arten



tionsart wird dann analog als Phasenmodulation (PM) bezeichnet. Fernsehen und Rundfunk (mit Ausnahme des UKW-Bereichs) verwenden AM (das Fernsehen eine modifizierte Form). Die UKW-Übertragung geschieht mittels FM.

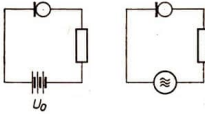


Bild 7.199.
Zur Amplitudenmodulation

Die mathematischen Zusammenhänge bei den Modulationen sind recht kompliziert (besonders bei FM und PM), deshalb soll hier nur die AM näher betrachtet werden. Für den Augenblickswert der Spannung über dem Widerstand R in einem Mikrofonkreis (Bild 7.199.) gilt:

$$u = U_0 + U_N \cos \omega_N t.$$

Die Gleichung formt man etwas um, wenn man den Modulationsgrad $m = \frac{U_N}{U_0}$ einführt:

$$u = U_0 (1 + m \cos \omega_N t).$$

Ersetzt man in Bild 7.199. U_0 durch eine Hochfrequenzspannungsquelle mit $u(t) = U \cos \omega_H t$, so folgt:

$$u(t) = U (1 + m \cos \omega_N t) \cos \omega_H t.$$

Durch trigonometrische Umformungen erhält man daraus:

$$u(t) = U \cos \omega_H t + \frac{U \cdot m}{2} \cos (\omega_H - \omega_N) t + \frac{U \cdot m}{2} \cos (\omega_H + \omega_N) t.$$

Das bedeutet, daß neben dem Träger zwei andere jeweils um ω_N nach unten und oben verschobene Signale von maximal halber Trägeramplitude auftreten. Da aber z. B. bei Sprach- und Musikübertragungen ω_N nicht konstant ist, sondern sich etwa zwischen 30 Hz und 20 kHz ändert, treten neben dem Träger Seitenbänder auf, die zum einwandfreien Empfang mit übertragen werden müssen.

Heute werden Informationen vielfach mit periodisch unterbrochenem Träger übertragen (Bild 7.200.).

Die Technik derartiger Übertragungen wird als Impulstechnik bezeichnet. Sie wird neben der Informationsübertragungstechnik in der Kurzzeitmeßtechnik (z. B. Funkmeßtechnik, Funkortung) und in Rechenmaschinen verwendet. Die Modulation von Impulsen wird als Pulsmodulation bezeichnet. Die Zeit t_i , in der der Träger ununterbrochen schwingt, ist die Impulslänge, das Maximum der in dieser Zeit auftretenden Amplituden ist die Impulshöhe A . Wichtig ist ferner der zeitliche Abstand T zweier aufeinanderfolgender Impulse (Periodendauer)

und das Tastverhältnis $k = \frac{t_i}{T} < 1$. Die zwischen zwei Impulsen liegende Zeit heißt Pausenzeit t_p (Bild 7.201.).

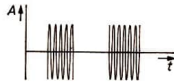


Bild 7.200. Zur Erklärung des Impulsbegriffs

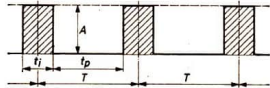


Bild 7.201. Zur Definition der Impulsgrößen

Die Impulse werden mit Hilfe einer Reihe verschiedener Schaltungen, vielfach mittels Multivibratoren und Sägezahngeneratoren erzeugt.

Die Vorteile der verschiedenen Pulsmodulationsverfahren sind:

1. Kurzzeitige, daher hohe Energieausstrahlung;
2. Mehrfachausnutzung des Trägers durch Zeitschachtelung (die Pausenzeit t_p wird zur Übertragung anderer Informationen ausgenutzt, Bilder 7.202. und 7.203., Seite 279);
3. geringere Störanfälligkeit bei einigen Verfahren.



Folgende Modulationsverfahren werden technisch angewendet:

1. Pulsamplitudenmodulation (PAM, die Impulshöhe wird im Rhythmus der Modulationsfrequenz geändert);
2. Pulsweitenmodulation (PLM, die Impulse haben gleiche Höhe und einen regelmäßigen Impulseinsatz, jedoch wird die Länge der Impulse durch die Modulationsfrequenz geändert);
3. Pulsphasenmodulation (PPM, die Impulse haben gleiche Höhe und Länge, jedoch wird ihre Lage innerhalb eines zugelassenen Phasenbereichs durch die Modulationsfrequenz geändert);

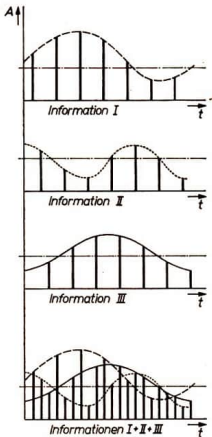


Bild 7.202. Schwingungsbilder bei einer Zeitschachtelung

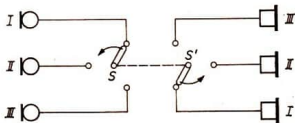


Bild 7.203. Prinzip einer Zeitschachtelung bei PAM

4. Pulsmodulation (PCM, die Amplituden der Modulationsfrequenz werden mit Hilfe geeigneter Geräte stufenweise [gequantelt] abgetastet und durch eine Spezialkatodenröhre in eine Signalfolge [etwa wie beim Morsealphabet] umgewandelt).

Die genannten Modulationsverfahren werden mit Hilfe vieler Modulationsschaltungen (Modulatoren) verwirklicht. Hier sollen nur wenige von ihnen zur Information kurz beschrieben werden.

Amplitudenmodulierte Schwingungen werden im allgemeinen an nichtlinearen Widerständen erzeugt. In der Fernmeldetechnik werden häufig Trockengleichrichter (Halbleiterdioden) in speziellen Schaltungen verwendet.

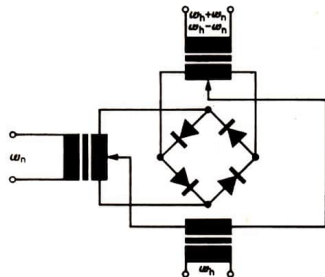


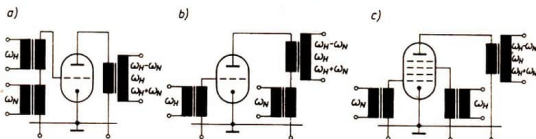
Bild 7.204. Schaltung eines Ringmodulators

Der Ringmodulator (Bild 7.204.), eine von mehreren Modulatorschaltungen mit Gleichrichtern, erzeugt die beiden Seitenbänder und unterdrückt den Träger. In den Empfangseinrichtungen muß der Träger zur Demodulation wieder zugesetzt werden. (Der Ringmodulator wird auch zur Demodulation verwendet.)

Zur Modulation höherer Frequenzen dienen Hochvakuumröhren. Bild 7.205., Seite 280, zeigt einige Modulationsschaltungen mit Röhren.



Bild 7.205.
Modulationsschaltungen mit Röhren



- a) Gitterspannungsmodulation (die Modulation erfolgt durch Verschieben des Arbeitspunktes aus der Kennlinie mittels der niederfrequenten Spannung);
- b) Anodenspannungsmodulation (die Modulation erfolgt durch Änderung der Röhrensteilheit als Folge der durch die niederfrequente Spannung beeinflussten Anodenspannung);
- c) Hexodenmodulation (die Modulation erfolgt dadurch, daß der Elektronenstrom durch die Röhre erst im Takt der NF [1. Gitter] und dann im Takt der HF [2. Gitter] gesteuert wird).

Wesentlich komplizierter sind die Schaltungen, mit denen Frequenz- und Phasenmodulationen ausgeführt werden können. Eine Frequenzmodulation kann man dadurch erzielen, daß ein Schaltelement des Schwingkreises (L oder C) im Rhythmus der Modulationsfrequenz geändert wird. Als wichtigstes Hilfsmittel dazu dient eine spezielle Röhrenschaltung (Reaktanzröhre), siehe [33], [35].

Demodulation. Eine der Hauptaufgaben eines Empfängers ist es, die Information vom Träger zu trennen. Das geschieht im Demodulator. Man unterscheidet direkte und indirekte Demodulation. Die direkte Demodulation ist eine unmittelbare Gleichrichtung der amplitudenmodulierten Schwingungen. Die indirekte Demodulation muß bei nichtamplitudenmodulierten Schwingungen angewendet werden. Bei ihr wird z. B. die frequenzmodulierte Schwingung in eine amplitudenmodulierte umgewandelt, welche dann direkt gleichgerichtet wird.

Bild 7.206. zeigt eine Schaltung, in der eine Diode (Halbleiterbauelement oder Elektro-

nenröhre ohne Steuergitter) zur Gleichrichtung verwendet wird. Der Schwingkreis LC speist die Gleichrichterdioden. Über R_H liegt dann die Richtspannung, die sich aus einer Gleichspannung und der überlagerten NF-Spannung zusammensetzt. Die HF-Spannung ist über C_H kurzgeschlossen. Über die Kombination $R_N C_N$ wird der Gleichstrom gesperrt, dabei ist C_N so zu bemessen, daß nicht auch die NF zurückgehalten wird. Über R_N liegt dann die aufmodulierte Wechselspannung, die jetzt einem Niederfrequenzverstärker zugeführt werden kann. Mit Dioden lassen sich weitere Demodulationsschaltungen aufbauen.

Betrachtet man Gitter und Katode einer Triode (oder Mehrgitterröhre) als Diode, so

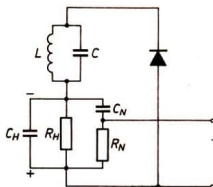


Bild 7.206. Diodengleichrichtung

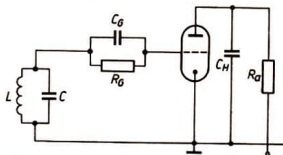


Bild 7.207. Schaltung eines Audions



kann man mit dieser Röhre gleichzeitig gleichrichten und verstärken. Eine derartige Schaltung heißt Audion (Bild 7.207.). Die vom Schwingkreis übertragenen Eingangsspannungen (möglichst klein, damit keine Verzerrungen auftreten) werden durch die Gitter-Katoden-Strecke gleichgerichtet. Über R_g erzeugt der Gitter-Katoden-Strom einen Spannungsabfall, der das Gitter im Rhythmus der Niederfrequenz mehr oder weniger negativ verspannt, so daß das Gitter den Anodenstrom steuert. Der Hochfrequenzanteil wird durch C_H kurzgeschlossen, über R_a wird die verstärkte Niederfrequenzspannung abgenommen. Der Schwingkreis wird durch eine Audionschaltung meist stark bedämpft. Deshalb koppelt man vielfach die verstärkte Hochfrequenz auf den Schwingkreis zurück (Bild 7.208.).

Weitere Demodulatorschaltungen, vor allem solche für FM, PM und Pulsmodulationen, werden in [42], [44] behandelt.

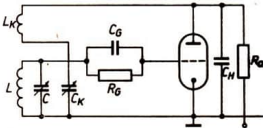


Bild 7.208. Rückgekoppeltes Audion

7.3.5. Informationskanal

Zum Informationskanal sollen hier außer Leitungen auch Einrichtungen gehören, mit deren Hilfe die Informationen an den Übertragungskanal abgegeben bzw. aus ihm aufgenommen werden.

Auf die Besprechung von Vermittlungseinrichtungen, Anpassungstransformatoren, Gabelschaltungen (Sondertransformatoren, mit deren Hilfe auf einem Leitungspaar ohne Umschalten ein Zweirichtungsbetrieb möglich wird) und spezielle Leitungsschaltungen muß hier verzichtet werden, hierzu siehe [39], [44].

Bei der Verwendung der Elektrizität als Träger von Informationen muß man zwischen drahtgebundener und drahtloser Informationsübermittlung unterscheiden.

Die Leitungen, die sich im Inneren der Sende- und Empfangsanlagen befinden, sollen hier zur besseren Unterscheidung von Fernleitungen kurz als Leiter bezeichnet werden. Als Material für derartige Leiter wird in den meisten Fällen Kupferdraht von entsprechendem Querschnitt verwendet. Eine Ausnahme machen allerdings Geräte, die im Bereich höchster Frequenzen arbeiten. Hier werden im allgemeinen Kupferrohre mit meist kreisförmigem oder rechteckigem Querschnitt verwendet. Durch sie werden die Signale in Form elektromagnetischer Wellen in axialer Richtung geführt.

Die Übermittlung drahtgebundener Informationen kann einmal über Freileitungen oder über Kabel erfolgen. In neuerer Zeit wird die Freileitung immer mehr durch das Kabel verdrängt.

Übertragung durch Freileitungen. An Masten (meist aus Holz) befinden sich Isolatoren, an denen die eigentliche Leitung befestigt ist. Sie besteht aus Kupfer, speziellen Kupferlegierungen bzw. aus einem Stahldraht, der mit einem Kupferüberzug versehen ist (das hat den Vorteil der hohen Zugfestigkeit im Stahlkern und der guten Leitfähigkeit des Kupfers).

Zur Verringerung des Nebensprechens (Störungen, die z. T. auf gegenseitige Induktion in parallelgeführten Leitungen zurückzuführen sind) werden die Leitungen nach einem bestimmten Plan gekreuzt.

Übertragung durch Kabel. Die isolierten Kupferleitungen, neuerdings auch solche aus Aluminium, werden zur Verminderung des Nebensprechens ebenfalls verseilt. Dabei sind die folgenden Verseilgruppen üblich:

1. Paar (zwei miteinander verseilte Adern);
2. Sternvierer (vier miteinander verseilte Adern);
3. DM-Vierer (*Dieselhorst-Martin-Vierer*, zwei miteinander verseilte Paare).



Die einzelnen Adern haben meist eine Papierisolation. Die einzelnen Verseilelemente (Paar, Sternvierer, DM-Vierer) werden weiter verseilt.

Das Kabel wird durch einen Bleimantel gegen Feuchtigkeit und durch eine Bewehrung gegen mechanische Beschädigungen geschützt.

Die bisher kurz beschriebenen Kabel werden als U-Kabel bezeichnet (unbespulte Kabel). Da jede Leitung bei der Übertragung die zu übertragende Information dämpft, werden die Leitungen für die verschiedenen Zwecke verändert. Zum Beispiel kann man die Induktivität eines Kabels erhöhen und seine Dämpfung vermindern, indem man das ganze Kabel mit einem Eisendraht umspinnt oder einem Eisenband umhüllt (Krapisierung, Krapup-Kabel). Das Krapup-Kabel wurde durch Kabel verdrängt, die mit Pupinspulen versehen sind (Bild 7.209.).



Bild 7.209. Schematische Darstellung eines Pupin-Kabels

Je nach der Lage der Spulen unterscheidet man L-Kabel (das sind Fernkabelleitungen aus 0,9 mm starken Kupferadern, die im Abstand von 1700 m mit Spulen von 12 mH belastet werden und als DM-Vierer verseilt sind) und K-Kabel (das sind Fernkabelleitungen aus 1,2 mm starken Kupferadern, die im Abstand von 425 m mit Spulen von 1 mH belastet werden und als Sternvierer verseilt sind).

Zur Übertragung höherer Frequenzen (Trägerfrequenzsysteme mit bis zu 200 Kanälen oder einem Fernsehkanal) werden Kabel benutzt, die aus einem Innenleiter (5 mm bzw. 2,6 mm \varnothing) und Außenleiter (18 mm; 9,4 mm bzw. 9,5 mm \varnothing) bestehen. Der Außenleiter umschließt den Innenleiter mantelförmig.

Der Abstand wird durch Styroflexwendel oder -scheiben konstant gehalten (Bild 7.210.). Ein solches Kabel wird als Koaxialkabel (Koaxialpaar) bezeichnet. Moderne Kabel sind z. B. als Fernsehkabel für kürzere Entfernungen (Ortskabel) mit vier Koaxialpaaren, einem Sternvierer und vier Rundfunkpaaren (das sind Stromkreise im Fernsprechnetz, die für Zwecke des Rundfunks genutzt werden und besonderen technischen Bedingungen genügen müssen) ausgerüstet oder als Fernkabel aus z. B. einem Koaxialpaar und acht Sternviere aufgebaut. Bei drahtloser Informationsübermittlung wird die modulierte Trägerschwingung über spezielle Leiter (Antennen) als elektromagnetische Welle abgestrahlt bzw. durch ähnlich gebaute Antennen aufgenommen. Der Aufbau und die Wirkungsweise von Antennen stellen ein Spezialproblem dar, das hier nicht näher betrachtet werden kann, hierzu siehe [33], [35].

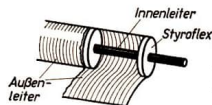


Bild 7.210. Aufbau eines Koaxialpaars

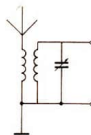


Bild 7.211. Schaltung einer Antennenkopplung

Am Eingang eines Empfängers wird die von der Antenne aufgefangene und in eine elektrische Schwingung umgeformte Welle auf einen abstimmbaren Schwingkreis (Bild 7.211.) gegeben, mit dessen Hilfe aus der Vielzahl der aufgenommenen Schwingungen diejenige durch Resonanz hervorgehoben wird, auf deren Frequenz der Schwingkreis abgestimmt ist. Die Antennenan Kopplung an den Schwingkreis kann durch Induktivitäten oder Kapazitäten erfolgen.



7.3.6. Stromversorgung

Die meisten der kurz betrachteten Baustufen von Informationsübertragungsanlagen werden durch Gleichspannung gespeist. Für Großanlagen, wie es viele kommerzielle Sendeanlagen, fast alle Rundfunk- und Fernsehsender sind, wird die Gleichspannung aus einem gesonderten Gleichspannungsnetz geliefert, das unter Benutzung zahlreicher Hilfseinrichtungen entweder durch rotierende Umformer oder mehr noch durch Quecksilberdampfgleichrichter bzw. Stromrichter gespeist wird.

Für die meisten Empfangsanlagen wird zur Stromversorgung ein Netzanschlußteil vorgesehen, wenn der Empfänger nicht nur für Batterie- oder Sammlerbetrieb ausgelegt ist.

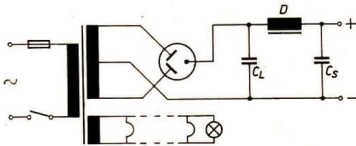


Bild 7.212. Netzteil eines Geräts für den Anschluß an ein Wechselstromnetz

Bild 7.212. zeigt ein Netzanschlußteil für ein Gerät, das an ein Wechselspannungsnetz angeschlossen werden soll. Die Primärwicklung des Transformators kann über Sicherung und Schalter an das Netz angeschlossen werden. Eine Wicklung dient oft zur Speisung des Heizkreises und der Skalenbeleuchtung (im Bild 7.212. Parallelheizung). Die andere Wicklung speist einen Zweigweg-Gleichrichter, dessen Ausgang über den Ladekondensator C_L (der Ladekondensator bewirkt, daß die am Gleichrichterausgang auftretende pulsierende Gleichspannung etwas geglättet wird, Bild 7.213.) auf eine Siebkette führt, in der durch eine Drossel die Gleichspannung geglättet wird, während der Kondensator C_S den Wechselspannungsanteil kurzschließt.

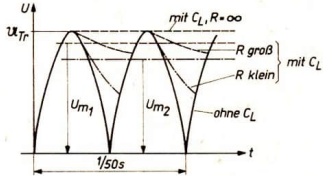


Bild 7.213. Zur Arbeitsweise des Ladekondensators

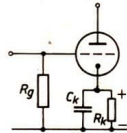


Bild 7.214. Erzeugung der direkten Gittervorspannung

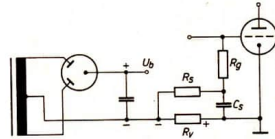


Bild 7.215. Erzeugung der indirekten Gittervorspannung

Die Spannung am Siebkondensator (ungefähr 250 V) stellt die Betriebsspannung für alle Röhren dar. Schirmgitterspannungen werden durch Vorwiderstände oder Spannungsteiler erzeugt. Die Gittervorspannung wird entweder direkt (Bild 7.214.) oder indirekt (Bild 7.215.) erzeugt.

Bei der direkten oder automatischen Gittervorspannung hat die Katode wegen R_k gegenüber Masse ein positives Potential.

C_k wird so gewählt, daß der Wechselstromwiderstand klein gegen R_k ist.

Bei der indirekten oder halbautomatischen Gittervorspannung erfüllt R_v den gleichen Zweck wie R_k in der Schaltung von Bild 7.214. Der über R_v entstehende Spannungsabfall bewirkt ein negatives Potential bei $-R_v/-R_s$ gegenüber Masse. Über die Siebkombination $R_s C_s$ gelangt die negative Spannung über R_g an das Gitter. Der Kon-



densator C_s kann gegenüber C_k in Bild 7.214. wesentlich kleiner sein. Bei Allstromempfängern (reine Gleichstromempfänger werden nicht mehr gebaut) erfolgt die Heizung im allgemeinen durch eine Reihenschaltung sämtlicher Heizfäden mit einem TP-Widerstand (Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizienten oder Kaltleiter, z. B. Eisen-Wasserstoff-Widerstand), der bei richtiger Auswahl den Heizstrom auch dann konstant hält, wenn die angelegte Netzspannung schwankt. Zum Schutz der Heizfäden beim Einschalten liegt außerdem ein TN-Widerstand (Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizienten oder Heißleiter) im Heizkreis, der im kalten Zustand einen hohen, im erwärmten Zustand einen niedrigen Widerstand hat. Die Gleichrichtung der möglicherweise angelegten Wechselspannung erfolgt durch einen Einweg-Gleichrichter. Zur Siebung und Glättung der erzeugten Gleichspannung dient die anschließende Siebkette (Bild 7.216.).

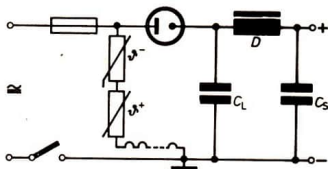


Bild 7.216. Netzteil eines Gerätes für Allstrom

Mit Hilfe eines elektronischen Zerkhackers kann eine Gleichspannung (z. B. aus einem Autosammler) in eine Wechselspannung umgeformt werden, die sodann durch einen Transformator auf die gewünschte Höhe gebracht wird, so daß es auch möglich ist, einen Empfänger völlig aus einer Batterie oder einem Sammler zu speisen.

Bei Verwendung von Transistoren und Halbleiterdioden erübrigen sich derartige Anlagen, da keine Heizspannungen benötigt werden und die der Anodenspannung

entsprechende Kollektorspannung in der Größenordnung um 10 V liegt.

Diese Spannung kann immer durch galvanische Elemente oder Kleinsammler zur Verfügung gestellt werden.

7.3.7. Abschließende Betrachtung

Ziel der vorangegangenen Abschnitte war es, einen Überblick über häufig verwendete Baugruppen zu geben, die bei der Übertragung von Informationen eingesetzt werden. Viele wichtige Bauelemente und Baugruppen mußten dabei unbeachtet bleiben. Das Zusammenspiel der etwas näher erläuterten Baugruppen soll durch die Bilder 7.217. bis 7.220., die Blockschaltpläne von Sende- und Empfangseinrichtungen darstellen, gezeigt werden.

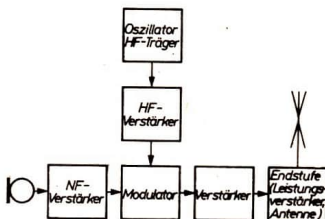


Bild 7.217. Blockschaltplan eines AM-Senders

Der Charakter des vorliegenden Buches verlangte eine konzentrierte Darstellung; nur so konnte das Gesamtgebiet der Elektrotechnik auf kleinem Raum beschrieben werden. Viele Erkenntnisse und Geräte aus einzelnen Spezialgebieten konnten nicht aufgeführt werden. Das nachfolgende Literaturverzeichnis enthält eine kleine Auswahl zu empfehlender Literatur.

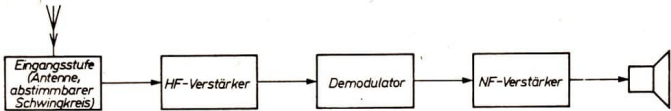


Bild 7.218. Blockschartplan eines Geradeempfängers

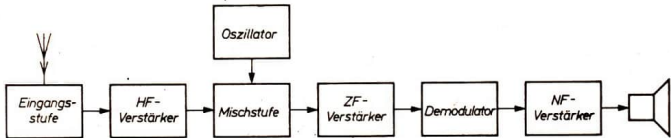


Bild 7.219. Blockschartplan eines Superhets

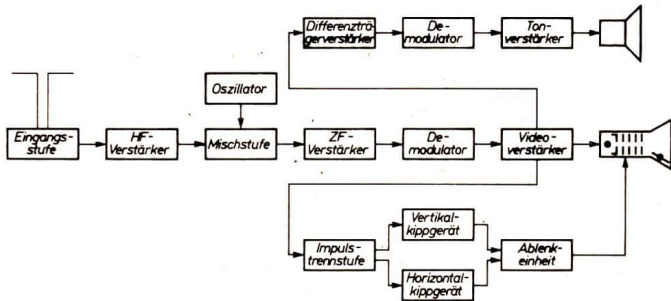


Bild 7.220. Blockschartplan eines Fernsehempfängers

7.4. Weiterführende Literatur

- [1] H. Schönfeld: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Hirzel Verlag, Leipzig 1952.
- [2] Claussnitzer: Einführung in die Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1973.
- [3] A. S. Kassatkin, M. A. Perekalin und P. S. Sergejew: Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1963.
- [4] Teuchert und Wahl: Grundlagen der Elektrotechnik. Bd. 1 und 2. VEB Verlag Technik, Berlin 1965.
- [5] H. Löbig und G. Schöne: Grundkenntnisse der Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.
- [6] Hildebrand S., und C. Markert: Zeichnungen und Darstellungen in der Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.
- [7] Philippow: Taschenbuch Elektrotechnik, Bd. 1, 2 und 3. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [8] H. Rachel: Grundlagen der praktischen Elektrotechnik. Lehrbriefreihe für das Fernstudium an der TU Dresden. VEB Verlag Technik, Berlin 1959.



- [9] K. Lunze und E. Wagner: Einführung in die Elektrotechnik, Bd. 1 und 2. VEB Verlag Technik, Berlin 1967 und 1971.
- [10] K. Lunze: Berechnung elektrischer Stromkreise. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [11] K. Lunze: Einführung in die Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.
- [12] K. Reusch, G. Hoshke und J. Scholz: Lehrbuch elektrischer Systeme, Band 1 und 2. VEB Verlag Technik, Berlin 1971.
- [13] J. Stanek: Technik elektrischer Meßgeräte. VEB Verlag Technik, Berlin 1961.
- [14] F. Henze: Atlas der Meßgeräte. VEB Verlag Technik, Berlin 1963.
- [15] R. Stohn: Akkumulatoren und Akkumulatorenanlagen. VEB Verlag Technik, Berlin 1959.
- [16] VEM-Kollektiv: VEM-Handbuch — Die Technik der elektrischen Antriebe. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [17] Autorenkollektiv: Starkstromanlagenbau. VEB Verlag Technik, Berlin 1965.
- [18] Autorenkollektiv: Elektromaschinenbau. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [19] Bödefeld und Sequenz: Elektrische Maschinen. Springer Verlag, Berlin 1965.
- [20] H. Spanneberg: Ruhende elektrische Maschinen. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [21] F. Henze: Schaltungen der Starkstromtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [22] Arthauer: Kabel und Leitungen. VEB Verlag Technik, Berlin 1961.
- [23] J. Gester und H. Lorenz: Starkstromleitungen. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [24] Heyn: Der Bau von Hochspannungsleitungen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968.
- [25] H. Bätz: Elektrische Schaltgeräte. VEB Verlag Technik, Berlin 1973.
- [26] Gester, Schmidt und Rank. Starkstromanlagen. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [27] W. Reichardt: Grundlagen der Elektroakustik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1960.
- [28] R. Drachsel: Grundlagen der elektrischen Meßtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [29] Fachkunde für Funkmechanik, Teil 1, 2 und 3. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [30] Rumpf: Bauelemente der Elektrotechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [31] H. Barkhausen: Elektronenröhren, Bd. 1. Hirzel Verlag, Leipzig 1969.
- [32] R. Wahl: Grundlagen der Elektronik, Reihe Automatisierungstechnik, Band 92. VEB Verlag Technik, Berlin 1970.
- [33] A. Möschwitzer: Halbleiterelektronik — Wissenspeicher. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [34] H. Semrad und W. Otto: Wissenspeicher — Grundlagen der Elektronik. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [35] Wallot: Einführung in die Theorie der Schwachstromtechnik. Springer Verlag, Berlin 1948.
- [36] W. Reichardt: Einführung in die Schwachstromtechnik. Lehrbriefreihe für das Fernstudium an der TU Dresden. VEB Verlag Technik, Berlin 1958.
- [37] R. Paul: Transistoren. VEB Verlag Technik, Berlin 1969.
- [38] R. Paul: Feldeffekttransistoren. VEB Verlag Technik, Berlin 1972.
- [39] I. Rudolf: Fernmeldebau für Facharbeiter im Fernmeldebetrieb und Fernmeldebau. Fachbuchverlag, Leipzig 1955.
- [40] R. Millner: Katoden-Strahl-Oszillographen. VEB Verlag Technik, Berlin 1969.
- [41] R. Kretzmann: Industrielle Elektronik. Verlag für Radio-Foto-Kino-Technik, Berlin 1952.
- [42] C. Rint: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker, Bd. 1 bis 7. Verlag für Radio-Foto-Kino-Technik, Berlin.
- [43] Hütte: Taschenbuch des Ingenieurs, Starkstromtechnik, Lichttechnik (IVa). Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1957.
- [44] Hütte: Taschenbuch des Ingenieurs, Fernmeldetechnik (IVb). Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962.
- [45] I. Czech: Oszillographenmeßtechnik. Verlag für Radio-Foto-Kino-Technik, Berlin 1970.
- [46] Weyh, U.: Elemente der Schaltungs algebra. R. Oldenburg Verlag, München und Wien 1964.
- [47] Caldwell, S. H.: Der logische Entwurf von Schaltkreisen. R. Oldenburg Verlag, München und Wien 1964



8. Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik

verfaßt von Ing. H. Hantke
und Dipl.-Ing. D. Hantke

Verwendete Formelzeichen

Kleine Buchstaben kennzeichnen bevorzugt zeitlich veränderliche Größen oder ihre Signale:

$h(t)$	Übergangsfunktion
w	Führungsgröße
x	Regelgröße
x_a, x_e	Ausgangsgröße, Eingangsgröße
x_s	Sollwert
x_w	Regelabweichung
y	Stellgröße
z	Störgröße
ω	Kreisfrequenz in Hz

Große Buchstaben kennzeichnen Konstanten oder Funktionssymbole:

E	Höhe des Eingangssprungs
$G(j\omega)$	Frequenzgang
I	Informationsparameter
K	Übertragungsfaktor
K_D	Differentialer Übertragungsfaktor
K_I	Integraler Übertragungsfaktor
K_P	Proportionaler Übertragungsfaktor
R	Regelfaktor
S	Signal
T	Zeitkonstante in s oder min
T_D	Differentialzeit in s oder min
T_I	Integralzeit in s oder min
T_t	Totzeit in s oder min
V	Verstärkung
X_B	Bleibende Regelabweichung
X	Signal

Indizes kennzeichnen die Größe wie folgt:

a	Ausgang des Signals
e	Eingang des Signals
i	innen
h	Hilfsgröße
K	Kompensation
0	ohne Verzögerung
R	Regeleinrichtung
S	Strecke
s	Sollwert
x	unbekannte Größe
v	laufender Index

Physikalische Größen:

A	Fläche in mm^2
B	Induktion in $\text{Vs mm}^{-2} = \text{Wb mm}^{-2}$
	$B = B $
c	Konstante
C	Kapazität in F
F	Kraft in N
i	Stromstärke in A
L	Induktivität in H
n	Drehzahl in min^{-1}
p	Druck in Pa
P	Leistung in W
R	Widerstand in Ω
s	Weg in mm
t, τ	Zeit in s
U, u	Spannung in V
v	Geschwindigkeit in ms^{-1} , $v = v $
W	Arbeit in J = Ws
λ	Lichtwellenlänge in μm
ϑ	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$; Temperaturdifferenz in K
φ	Winkel in rad

8.1. Vorbemerkung

Die technischen Prozesse werden in der modernen Produktion immer komplizierter und umfangreicher. Eine Vielzahl von Größen muß beobachtet und überwacht werden. Dieselben und andere Größen werden durch Eingriff in den Prozeß gemäß dem gewollten Ablauf beeinflußt.

Die mechanische Arbeit, die der Mensch dabei leistet, ist gering und unwesentlich für diesen Ablauf. Wesentlicher ist, daß der Mensch die *Informationen* über den Verlauf des Prozesses *verarbeitet*. Die Informationen werden ihm durch *meßwertabhängige Signale*, die z. B. an Meßgeräten ablesbar sind, übermittelt. Unter Benutzung seines Wissens und seiner Erfahrung und unter Be-



rücksichtigung seiner Aufgabenstellung – dem *Programm* des Prozesses – muß er diese Informationen gedanklich richtig verarbeiten. Das Ergebnis dieser Überlegungen sind dann *Befehlssignale*, die der Mensch nun seinerseits durch Betätigung von Schaltern, Ventilen usw. in den Prozeß gibt. Diese Beschreibung der menschlichen Tätigkeit gilt für einfache Arbeiten, wie die Herstellung einfacher Werkstücke, genauso wie für schwierige, z. B. die Arbeit in einer Warte eines Erdölverarbeitungswerkes.

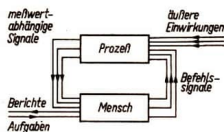


Bild 8.1. Schematische Darstellung der menschlichen Tätigkeit in der Produktion

Im Bild 8.1. wurde für Teile des *Signalflusses*, in denen keine oder keine wesentliche Veränderung des Signals erfolgt, eine einfache Linie gezeichnet. Teile des Signalflusses, in denen eine Veränderung oder Verarbeitung der Signale erfolgt, bezeichnet man als *Glieder*. Sie werden durch rechteckige Kästchen dargestellt. Darstellungen des Signalflusses werden als *Signalflußplan* bezeichnet. Sie erweisen sich als außerordentlich praktisch und werden im folgenden noch eingehender behandelt.

Ursprünglich wurden solche Betrachtungen vorwiegend in der Elektro-, Regelungs- und Steuerungstechnik angewandt. Im Laufe der Entwicklung stellte man dann fest, daß ähnliche Betrachtungsweisen von zeitabhängigen Vorgängen und signalverarbeitenden Systemen auch für andere Wissensgebiete fruchtbringend sind. So enthält die *Kybernetik* wesentliche Teile der Regelungstheorie. Über die Regelungstheorie hinausgehend, enthält sie weitere Zweige der Nachrichtentheorie – insbesondere der statistischen Nachrichtentheorie –, der Korrelationselektronik, der Netzwerktheorie, der Theorie der logischen Schaltungen, der Systemtheorie, der mathematischen Theorie der Spiele, der Algorithmentheorie und andere. Angewendet wird die Kybernetik u. a. in der Biologie, Physiologie, Psychologie, Pädagogik, Sprachwissenschaft,

Logik, Ökonomie, bei der Lenkung von umfangreichen Produktionsprozessen und insbesondere bei großen informationsverarbeitenden Anlagen wie Rechenautomaten (siehe [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]).

Nach Bild 8.1. geschieht die Verarbeitung von Signalen nicht nur durch den Menschen.

Eine Klingelanlage übermittelt z. B. das Signal: „Es ist jemand an der Tür.“ Das geschieht aber nur, wenn die Taste gedrückt ist. Nach Loslassen der Taste „vergißt“ sie sofort ihren Auftrag. Auf eine Betätigung durch den Menschen reagiert der Lichtschalter im Wohnzimmer ganz anders. Er „merkt sich“ das Signal: „Die Lampe soll leuchten“ bis zur nächsten Betätigung. Das gleiche vom Menschen gegebene Eingangssignal wird durch Taste und Schalter demnach verschieden verarbeitet. Mit solchen einfachen Bauelementen sind die Möglichkeiten der Signalverarbeitung bei weitem nicht erschöpft.

Komplizierte technische Einrichtungen können den Menschen außer von körperlicher Arbeit auch von Signalverarbeitungen befreien und somit eine Erhöhung der Arbeitsproduktivität ermöglichen.

8.2. Steuern und Regeln

Häufig ist die Aufgabe gestellt, die Temperatur einer Flüssigkeit konstant zu halten. An einem Beispiel (Bild 8.2.) soll erklärt werden, wie diese Aufgabe einmal durch eine Steuerung und zum anderen durch eine Regelung gelöst werden kann. Durch das Rohr 1 trete Wasser mit einer Temperatur $\vartheta_1 = 80^\circ\text{C}$ bis 100°C . Mit dem aus Rohr 2 kommenden Wasser, das eine Temperatur von $\vartheta_2 = 15^\circ\text{C}$ bis 20°C haben möge, solle durch geeignete Einstellung des Ventils 6 die Mischtemperatur $\vartheta_3 = 50^\circ\text{C}$ konstant gehalten werden. Die Temperaturfühler 4 und 5 dienen zum Messen der Temperaturen in den Rohren 1 und 3 (Bild 8.2.a).

Man kann nun Geräte 7 (Bild 8.2.b) zwischen Temperaturfühler 4 und Ventil 6 einbauen, die bei steigender Temperatur ϑ_1 das Ventil 6 so weit öffnen, daß das hinzuströmende kalte Wasser die Wirkung des



Anstiegs von ϑ_1 gerade kompensiert. Hat man die Geräte 7 bei der zufällig im Rohr 2 herrschenden Temperatur von $\vartheta_2 = 15^\circ\text{C}$ eingestellt, so arbeitet die Anlage nur dann zur Zufriedenheit, wenn diese Temperatur konstant bleibt. Erhöht sich ϑ_2 auf 20°C , so erhöht sich auch ϑ_3 , ohne daß die Geräte „etwas unternehmen“. Der Zufluß des kalten Wassers wird eben nur durch ϑ_1 gesteuert und nicht durch ϑ_3 . Auch wenn sich die je Zeiteinheit durch das Rohr 1 oder 2 fließende Menge ändert, hat dies einen Einfluß auf ϑ_3 , dem die Geräte nicht entgegenwirken.

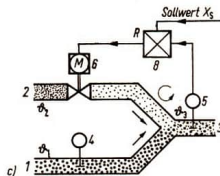
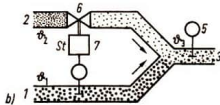
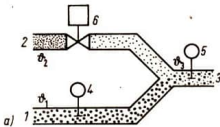


Bild 8.2. Die Aufgabe, eine Temperatur ϑ_3 konstant zu halten, Bild a, wird in Bild b durch eine Steuerung und in Bild c durch eine Regelung gelöst

Diese Nachteile der Steuerung vermeidet die Regelung nach Bild 8.2.c. Immer wenn die Temperatur ϑ_3 von ihrem Sollwert abweicht (es ist gleichgültig, woher diese Abweichung rührt), wird auch das Ventil 6

verstellt. Erhöht sich z. B. bei konstanter Temperatur ϑ_1 der Durchfluß durch das Rohr 1, so erhöht sich auch ϑ_3 . Der Regler 8 reagiert darauf, indem er das Ventil weiter öffnet. Das verstärkt hinzuströmende kühlere Wasser wird ϑ_3 erniedrigen. Untersucht man den Weg des Signals „ ϑ_3 zu hoch“, so stellt man fest, daß es nach einem Kreislauf über die Stationen 5, 8, 6, dem Regelkreis, wieder am Temperaturfühler 5 eintrifft. Außer einer Betragsänderung hat es dabei auch eine *Vorzeichenumkehr* erfahren; es heißt jetzt nämlich „ ϑ_3 niedriger“. Dieser Kreislauf ist das charakteristische Kennzeichen einer Regelung. Bei einer Steuerung treten dagegen nur Kettenwirkungen auf. Ein einmal ausgelöstes Signal kehrt nicht wieder an den gleichen Ort zurück (Bild 8.2.b). Man spricht deswegen auch von einer *Steuerkette*.

Auch die Regelung hat Nachteile. Diese sind gerade durch den Kreislauf bedingt. Nach einem einzigen Umlauf wird der Sollwert im allgemeinen noch nicht erreicht sein, und ein neues Signal wird seinen Kreislauf aufnehmen. Dieses Spiel kann sich mehrmals wiederholen. In günstigen Fällen wird sich der gewünschte Wert nach einigen Schwingungen einstellen. Baut man den Regler jedoch sehr empfindlich, so daß er auf kleine Temperaturabweichungen mit großen Ventilstellungen reagiert, können *Dauerschwingungen* auftreten. Aus einem ersten Signal „ ϑ_3 etwas zu hoch“ wird nämlich nach einem Umlauf: „ ϑ_3 viel zu niedrig“, nach dem zweiten Umlauf: „ ϑ_3 viel zu hoch“ usw. Solche nicht abklingenden Schwingungen sind das Kennzeichen *instabiler* Regelungen. Stabilitätsprobleme stellen einen wesentlichen Teil der Regelungstheorie dar.

8.3. Signale

8.3.1. Signal, Informationsparameter, Signalträger

Der Mensch nimmt im Produktionsprozeß vorwiegend Zeigerstellungen von Meßinstrumenten sowie andere optische und akustische Zeichen als Eingangssignale auf. Die Betätigungen von Tasten, Schaltern, Handrädern, Hebeln usw. sind seine Ausgangssignale. In signalverarbeitenden Geräten werden andere physikalische Größen als *Signalträger* verwendet. Bevorzugt werden



Gleichspannung, Gleichstrom und Druck in Luft- oder Ölleitungen, weil mit ihnen eine bequeme Signalverarbeitung und einfache Überbrückung größerer Entfernungen, wie sie etwa in einem Fabrikgelände auftreten, möglich sind.

Der Begriff *Signal* und mit ihm zusammenhängende Begriffe wurden im vorangegangenen dem normalen Sprachgebrauch entlehnt. Diese Begriffe werden im folgenden präzisiert: Häufig interessiert der Werteverlauf einer physikalischen oder technischen Größe. Dieser sei zu signalisieren. Wenn nun eine von einer physikalischen Größe getragene Zeitfunktion einen Parameter besitzt, der den Werteverlauf der zu *signalisierenden Größe* abbildet, nennt man diese Zeitfunktion *Signal*. Der entsprechende Parameter heißt *Informationsparameter I*. Die Abbildung muß dabei so erfolgen, daß eindeutige Rückschlüsse vom Informationsparameter auf die signalisierte Größe möglich sind.

8.3.2. Einteilung der Signale

Kann der Informationsparameter alle Werte zwischen seinem größten und kleinsten Wert annehmen, spricht man von *analogen Signalen*. Bei *diskreten Signalen* können nur endlich viele Werte vom Informationsparameter eingenommen werden. *Binäre Signale* sind spezielle diskrete Signale, deren Informationsparameter nur zwei Werte annehmen kann. Werden ausschließlich ganzzahlige Vielfache einer Einheit der signalisierten Größe abgebildet oder allgemeiner: Entsprechen diskrete Werte des Informationsparameters einem vereinbarten *Alphabet*, so liegen *digitale Signale* vor. Diskrete nicht digitale Signale heißen *Mehrpunktsignale*. Ist der zeitliche Verlauf eine stetige Funktion der Zeit, nennt man das Signal *stetiges Signal*, andernfalls *unstetiges Signal*. Manchmal wird der Werteverlauf der signalisierten Größe nur in festgelegten Intervallen „abgefragt“. Deswegen definiert man noch *kontinuierliche* und *diskontinuierliche Signale*. Bei kontinuierlichen Signalen kann

sich der Informationsparameter in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern, bei diskontinuierlichen nicht. Mehrpunkt- und digitale Signale wurden dabei nicht unterschieden, da man den Signalen nicht entnehmen kann, ob ein Alphabet vereinbart wurde (siehe auch [10]).

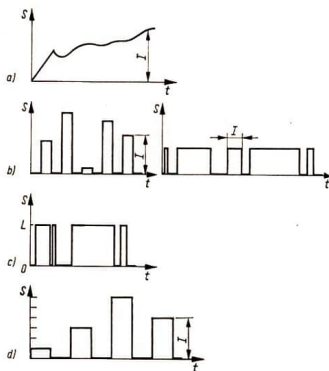


Bild 8.3. a Kontinuierlich analoges Signal; b Diskontinuierlich analoge Signale (Impulshöhenmodulation und Impulsbreitenmodulation); c Kontinuierliche binäre Signale (Informationsparameter kann nur zwei Werte annehmen); d Diskontinuierliche diskrete Signale (Amplituden sind ganzzahlige Vielfache einer Einheit)

8.4. Glieder

8.4.1. Definitionen und allgemeine Eigenschaften

Die Signalverarbeitung in Steuerketten und Regelkreisen erfolgt in den Gliedern. Bei funktionellen Betrachtungen nennt man die Glieder *Übertragungsglieder*. Bei mehrgerätetypischen Betrachtungen heißen die Glieder *Bauglieder*. Übertragungsglieder sind prinzipiell rückwirkungsfrei. Für Bauglieder braucht diese Forderung, daß die Ausgangs-



signale nicht auf die Eingangssignale rückwirken können, nicht unbedingt erfüllt zu sein. Nur bei Übertragungsgliedern lassen sich demnach entsprechend der Wirkungsrichtung Ein- und Ausgänge exakt unterscheiden.

Eine wichtige Gruppe von Baugliedern sind die *Strecken*. Sie stellen den Teil einer Anlage dar, der bzw. in dem aufgabengemäß gesteuert (Steuerstrecke) oder geregelt (Regelstrecke) werden soll. Die Signalverarbeitung in den Strecken ist meist durch den Prozeß vorgegeben.

In den *Regel- und Steuereinrichtungen* – sie bestehen praktisch aus den Geräten, die in die Anlage eingebaut wurden – wird die Signalverarbeitung der einzelnen Glieder weitgehend den Erfordernissen angepaßt.

Ähnlich wie bei den Signalen gibt es analoge, diskrete, kontinuierliche, diskontinuierliche, stetige und unstetige Übertragungsglieder. Unter ihnen gibt es Übertragungsglieder, die verschiedene Rechenoperationen ausführen, und andere, die logische Entscheidungen fällen können. Im folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften und Methoden zur Untersuchung von Übertragungsgliedern angegeben.

8.4.2. Analoge Glieder

8.4.2.1. Definition

Ein Übertragungsglied, das auf analoge Eingangssignale hin analoge Ausgangssignale abbildet, heißt analoges Glied.

8.4.2.2. Statische Kennlinie, Grundtypen

Die Einteilung der Glieder erfolgt nach der Art der Signalverarbeitung. Diese *Übertragungseigenschaften* von Gliedern sind durch Messungen und Berechnungen zu ermitteln. In der Praxis stößt die Berechnung von Übertragungseigenschaften – insbesondere der von Strecken – häufig auf Schwierigkeiten. In diesen Fällen ist man ausschließlich auf Messungen angewiesen. Zur Beschreibung der Eigenschaften nimmt man die *Kennlinie* des Gliedes auf. Die *statische*

Kennlinie stellt die Abhängigkeit des Informationsparameters des Ausgangssignals von dem des Eingangssignals dar. Diese Definition gilt nur für Glieder mit *einem* Eingangssignal und *einem* Ausgangssignal. Bei Gliedern mit mehreren Eingangssignalen ergibt sich ein Kennlinienfeld, in dem die konstanten Informationsparameter als Kurvenparameter auftreten. Bei der Messung *statischer Kennlinien* muß der *eingeschwungene Zustand* gewertet werden, wie man es z. B. beim Ablesen von Meßinstrumenten auch gewöhnt ist.

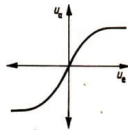


Bild 8.4.
Statische Kennlinie
eines Verstärkers

Bild 8.4. zeigt die statische Kennlinie eines elektronischen Verstärkers. Bei sehr großen Eingangsspannungen U_e erreicht die Ausgangsspannung U_a einen konstanten Wert (Sättigung). Für kleine Eingangsspannungen ergibt sich mit guter Näherung eine lineare Abhängigkeit, eine Proportionalität, so daß man schreiben kann

$$u_a = V \cdot u_e.$$

Allgemein definiert man für Glieder, deren Kennlinie durch eine Gerade hinreichend genau genähert werden kann, einen *proportionalen Übertragungsfaktor* K_P

$$K_P = \frac{x_{a2} - x_{a1}}{x_{e2} - x_{e1}}.$$

Darin ist x_e die Eingangs- und x_a die Ausgangsgröße (Bild 8.5.a). Glieder, die sich durch einen proportionalen Übertragungsfaktor beschreiben lassen, heißen *P-Glieder*. Man findet auch Glieder, bei denen im eingeschwungenen Zustand die Ausgangsgröße x_a (mit gewisser Näherung) dem zeitlichen

Integral $\left(\int_0^t x_e d\tau \right)$ der Eingangsgröße x_e pro-

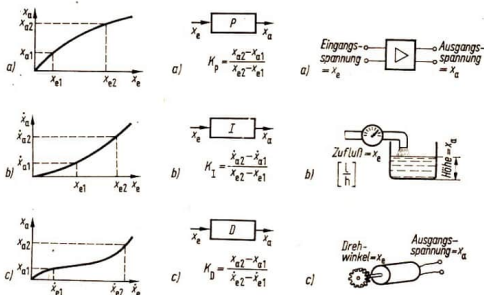


Bild 8.5.

a) P-Glied, statische Kennlinie, Übertragungsfaktor, elektronischer Verstärker als Beispiel eines P-Gliedes;
 b) I-Glied, statische Kennlinie, Übertragungsfaktor, Behälterstand als Beispiel eines I-Gliedes;
 c) D-Glied, statische Kennlinie, Übertragungsfaktor, Tachogenerator als Beispiel eines D-Gliedes

portional ist. (Gleichbedeutend ist die Aussage, daß die zeitliche Ableitung der Ausgangsgröße \dot{x}_a der Eingangsgröße x_e proportional ist.)

Ein solches Glied stellt z. B. ein Flüssigkeitsbehälter mit von der Höhe unabhängigen Querschnitt dar, wenn als Ausgangsgröße die Höhe des Flüssigkeitsspiegels und als Eingangsgröße die zufließende Menge je Zeiteinheit – der Zufluß – aufgefaßt werden.

Man definiert ähnlich wie beim P-Glied einen *integralen Übertragungsfaktor* K_I zu

$$K_I = \frac{\dot{x}_{a2} - \dot{x}_{a1}}{x_{e2} - x_{e1}}$$

und nennt Glieder, die sich durch einen integralen Übertragungsfaktor beschreiben lassen, *I-Glieder* (Bild 8.5. b).

Glieder, deren Ausgangsgröße (x_a) im eingeschungenen Zustand von der zeitlichen Ableitung der Eingangsgröße (\dot{x}_e) abhängt, heißen *D-Glieder*. Der Ausdruck

$$K_D = \frac{x_{a2} - x_{a1}}{\dot{x}_{e2} - \dot{x}_{e1}}$$

ist der *differentiale Übertragungsfaktor*.

Generatoren mit drehzahlproportionaler Ausgangsspannung (Tachogenerator) sind D-Glieder, wenn der *Drehwinkel* des Rotors die Eingangsgröße und die abgegebene Spannung die Ausgangsgröße ist (Bild 8.5. c).

Die Angabe, welche physikalischen Größen Signalträger sind, ist wichtig, weil die Übertragungseigenschaften eines Baugliedes in verschiedener Weise genutzt werden können. Zum Beispiel ist der Tachogenerator ein P-Glied, wenn die Drehzahl des Rotors das Eingangs- und die

abgegebene Spannung das Ausgangssignal darstellt. Ein Motor mit spannungsproportionaler Drehzahl ist ein P-Glied, wenn die Speisespannung als Eingangsgröße und die Drehzahl als Ausgangsgröße zu gelten haben. Er ist ein I-Glied, wenn der Drehwinkel oder der zurückgelegte Weg einer vom Motor über ein Getriebe angetriebenen Zahnstange Ausgangsgrößen sind. Auch das Beispiel mit dem Behälterstand (Bild 8.5. b) läßt sich als P-Glied auffassen, wenn nicht mehr der Zufluß ($\frac{l}{h}$), sondern die zugeflossene Menge (l) Eingangsgröße ist.

8.4.2.3. Übergangsfunktion

Die Übertragung von Signalen ist stets an eine Energieübertragung gebunden, wenn diese Energien häufig auch sehr gering sind. Informationen vermag nur das Signal zu vermitteln, dessen Informationsparameter mindestens zwei Werte annehmen kann. Eine sprunghafte Änderung des Informationsparameters ist demnach unmöglich, da die mit ihr verbundene sprunghafte Energieänderung, also eine Arbeit W in der Zeit $t = 0$, gemäß $P = \frac{dW}{dt}$, eine unendlich große Leistung erfordern würde. Alle signalverarbeitenden Vorgänge laufen verzögert, trägheitsbehaftet ab. Diese Verzögerungen lassen sich häufig so klein halten, daß man in der Praxis mit gutem Recht von sprunghaftigen Änderungen sprechen kann. Dem Auge erscheinen z. B. viele elektrische Erscheinungen als „blitzschnell“. Wirken jedoch größere Energiespeicher, wie Konden-



satoren, Induktivitäten, bewegte oder erwärmte Massen und aufzufüllende Luftvolumina, mit, deren Energieänderung eine Änderung des Informationsparameters bedeutet, so ergeben sich immer merkliche Verzögerungen.

Als Beispiel sei eine Schaltung mit einem Kondensator C als Energiespeicher und einem Widerstand R als einem energieabstrahlenden Element (Bilder 8.6., 8.7., 8.8.) genannt. Schaltet man eine Spannung E auf die Eingangsklemmen, so daß für $t < 0$ die Eingangsspannung $x_e = 0$ und für $t > 0$ die Eingangsspannung $x_e = U_e = E$ ist, ergibt sich für $x_a = U_a$ eine Exponentialfunktion, die für $t = 0$ den Wert $x_a = 0$ hat und sich mit dem im Bild 8.7. gezeigten Verlauf asymptotisch dem Wert $x_a = E$ nähert. Rechnerisch ergibt sich der Verlauf nach Lösung einer einfachen Differentialgleichung (für $t > 0$)

zu $x_a = E \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right)$. $CR = T$ ist die Zeitkonstante des Vorgangs.

Man kann nachrechnen, daß bei $t = T$ die Ausgangsspannung $x_a \approx 0,63 E$ ist. Eine weitere Rechnung ergibt für

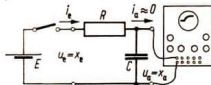


Bild 8.6. Untersuchung eines elektrischen Gliedes

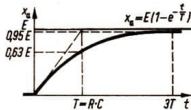


Bild 8.7. Ausgangssignal nach Bild 8.6.

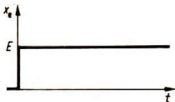


Bild 8.8. Eingangssignal nach Bild 8.6.

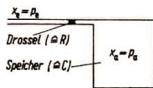


Bild 8.9. Drossel-Speicher-System

die im Ursprung angelegte Tangente für $\bar{x}_t = T$ einen Schnittpunkt mit der Geraden $x_a = E$.

Diese Betrachtungen lassen sich auf alle wirkungsmäßig ähnlich aufgebauten Glieder erweitern.

Ein Beispiel dafür ist das pneumatische Drossel-Speicher-System im Bild 8.9. Die Drücke p in der Rohrleitung bzw. im Behälter verhalten sich ähnlich wie die entsprechenden Spannungen im vorigen Beispiel. In beiden Fällen ist übrigens $K_p = 1$. Das hier an einem Beispiel geschilderte Verfahren zur Untersuchung der statischen und dynamischen Eigenschaften von Gliedern wird wegen seiner Einfachheit häufig angewendet. Die Reaktion des Ausgangssignals auf ein Sprungsignal am Eingang heißt *Sprungantwort* $x_a(t)$.

Die Dimension der Sprungantwort ist die des Ausgangssignals.

Die durch die Höhe E des Eingangssprunges dividierte Sprungantwort $x_a(t)$

heißt *Übergangsfunktion* $h(t) = \frac{x_a(t)}{E}; t \geq 0$.

Diese Division bewirkt bei *linearen Gliedern* – das sind Glieder mit linearer Kennlinie, für sie gilt das Superpositionsgesetz – die Unabhängigkeit der Übergangsfunktion von der Höhe des Eingangssprunges.

8.4.2.4. Grundtypen von linearen Gliedern und ihre Übergangsfunktionen

Das erwähnte R - C -Glieder (Bild 8.6.) und das Drossel-Speicher-System (Bild 8.9.) sind Beispiele für *Verzögerungsglieder 1. Ordnung*, kurz T_1 -Glieder (Bild 8.10.). Die 1 deutet darauf hin, daß die beschreibende Differentialgleichung von 1. Ordnung ist. *Verzögerungsglieder 2. Ordnung* – kürzer T_2 -Glieder – können Systeme mit 2 Energiespeichern sein. Dazu gehören z. B. Schwingkreise und Feder-Masse-Systeme (Bild 8.10.). Eine Federwaage ist ein *schwingendes* T_2 -Glieder, wenn ihre Dämpfung gering ist. Ein Drehpulvinstrument kann prinzipiell auch schwingen, wird jedoch häufig so gedämpft (aperiodischer Grenzfall!), daß es den Endwert nicht übersteigt (nicht schwingendes T_2 -Glieder). – Für die Über-



Bezeichnung	Beispiele	Übergangsfunktion	Symbol
T_1 -Glieder			
T_2 -Glieder schwingend und nicht schwingend			
Glieder höherer Ordnung			
T_t -Glieder			
P_0 -Glieder			
I_0 -Glieder			
D_0 -Glieder			

Bild 8.10. Beispiele für T_1 -, T_2 -, T_t -, P_0 -, I_0 - und D_0 -Glieder



gangsfunktionen 2. und höherer Ordnung ist die Anfangssteigung ($\frac{dh}{dt}$ für $t = +0$)

gleich Null. Das ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu Übergangsfunktionen 1. Ordnung. Temperaturstrecken, wie Wohnräume oder industrielle Öfen, sind meist sehr träge Strecken höherer Ordnung.

Besonders schwer zu regeln sind Strecken mit *Totzeit*. Totzeitglieder treten bei Mischungs- und anderen Vorgängen auf, die mit einem Massentransport verbunden sind. Zwischen Verzögerungsgliedern und Totzeitgliedern besteht ein qualitativer Unterschied, wie ein Blick auf die Übergangsfunktionen nach Bild 8.10. zeigt.

Unter 8.4.2.2. waren Beispiele für P-, I- und D-Glieder angegeben worden. Will man andeuten, daß Glieder dieser Art praktisch ohne Verzögerung arbeiten, deutet man dies durch den Index 0 an. Ohmsche Spannungsteiler oder Rohrleitungsnetze mit Druck als Ein- und Ausgang sind mit guter Näherung also P_0 -Glieder. — Das bereits bekannte Beispiel mit dem Behälterstand ist ein Beispiel für ein I_0 -Glieder. Für einen

Kondensator gilt $u_C = \frac{1}{C} \int i \, dt$. Speist man in den Kondensator einen Strom x_e , so hat man mit der Kondensatorspannung als Ausgangsgröße x_a ein weiteres I_0 -Glieder.

I-Glieder werden auch *Glieder ohne Ausgleich* genannt, weil ihre Übergangsfunktion keinem endlichen Wert zustrebt. — Vernachlässigt man die durch die Induktivität der Wicklungen hervorgerufenen elektrischen Verzögerungen, so kann man einen Tachogenerator als D_0 -Glieder ansehen. Eine ideale Induktivität wäre in der gezeigten Schaltung wegen $u_L = L \frac{di}{dt}$ ebenfalls ein D_0 -Glieder. Technische Spulen haben stets einen nicht zu vernachlässigenden Widerstand. Mit ihnen ist ein D_0 -Glieder nur grob anzunähern. Die Übergangsfunktion eines D_0 -Glieder stellt einen sehr hohen (idealisiert unendlich hoch) und sehr schmalen Impuls dar (Bild 8.10.).

8.4.2.5. Frequenzgang, Ortskurve, Frequenzkennlinie

Neben dem Eingangssprung werden noch andere Testsignale zur Bestimmung der Übertragungseigenschaften von Gliedern benutzt. So sind die aus der Elektrotechnik (siehe Seite 272 ff.) bekannten Frequenzganguntersuchungen mit sinusförmigen Signalen sehr gebräuchlich und aussagekräftig. Die Ausgangsgröße linearer, sinusförmig erregter Glieder ist im eingeschwungenen Zustand eine Sinusschwingung mit der Erregerfrequenz. Ihre Amplitude und die Phasenverschiebung zur Eingangsspannung sind im allgemeinen frequenzabhängig. Die Beschreibung geschieht zweckmäßig mit der komplexen Rechnung (siehe Seite 223 und [1]). Damit lautet die transformierte Eingangsgröße $x_e = x_{e0} e^{j\omega t}$ und die Ausgangsgröße $x_a = x_{a0} e^{j(\omega t + \varphi)}$.

Der Quotient $G = \frac{x_a(j\omega)}{x_e(j\omega)} = \frac{x_{a0}(\omega)}{x_{e0}} \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ ist der

Frequenzgang. Er wird auch mit F bezeichnet. Der Betrag $|G(j\omega)| = \frac{x_{a0}(\omega)}{x_{e0}}$ heißt Amplitudengang, $\arg G(j\omega)$

$= \varphi(\omega)$ Phasengang. Die Darstellung des $\log |G(j\omega)|$ als Funktion von $\log \omega$ ist die *Amplitudenkennlinie*. Ähnlich ist die Darstellung des Phasenganges als Funktion von $\log \omega$ die *Phasenkennlinie*. Amplituden- und Phasenkennlinie heißen gemeinsam *Frequenzkennlinie*. Die *Ortskurve* des Frequenzganges ist seine grafische Darstellung in der komplexen Zahlenebene mit ω als Parameter. Wichtig ist, daß die Amplitudenquotienten und Phasendifferenzen im eingeschwungenen Zustand gemessen werden müssen (siehe [8]).

8.4.3. Rechenglieder

Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division und andere Rechenoperationen mit zwei und mehr Eingangsgrößen sowie Operationen, wie Potenzieren, Radizieren usw., mit einer Eingangsgröße ausführende Glieder heißen *Rechenglieder*. Sie erhalten im Signallaßplan ein Symbol nach Bild 8.11. In das Kästchen wird die auszuführende mathematische Operation eingetragen.

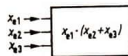
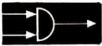


Bild 8.11.
Symbol eines
Rechengliedes

Wie z. B. ein Signal von einem anderen subtrahiert werden kann, ist aus Bild 8.12. zu entnehmen: Die Drücke p_1 und p_2 üben auf die Membran (Fläche A) gegeneinander wirkende Kräfte F_1 und F_2 aus, deren Differenz, mit einem Stoßel weitergeleitet, die Ausgangsgröße ist. Ein Beispiel für die Multiplikation zweier Eingangsgrößen ist im Bild 8.13. dargestellt. Bei kleinem Ausgangsstrom



i_a ist die Ausgangsspannung x_a sowohl der Gesamtspannung x_{e1} des Spannungsteilers als auch dem Teilwiderstand R_2 proportional. Dieser Teilwiderstand ist bei linearen Drehwiderständen proportional dem eingestellten Winkel $\varphi_2 = x_{e2}$. Demnach ist die Ausgangsspannung x_a ein Maß für das Produkt der beiden Eingangsgrößen x_{e1} und x_{e2} .

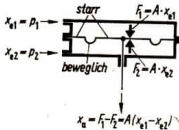


Bild 8.12.
Beispiel für die Ausführung einer Subtraktion

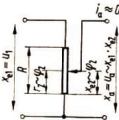


Bild 8.13.
Beispiel für die Ausführung einer Multiplikation

8.4.4. Diskrete Übertragungsglieder und ihre Eigenschaften

8.4.4.1. Definition

Bei diskreten Übertragungsgliedern kann das Ausgangssignal nur diskrete Werte annehmen.

Bild 8.14. zeigt die Kennlinie eines Gliedes, dessen Ausgangssignal nur 3 Werte annehmen kann. Der Übergang von einem Ausgangssignal zum anderen erfolgt, wenn das (analoge oder diskrete) Eingangssignal bestimmte Werte (x_{e1} , x_{e2}) über- bzw. unterschreitet.

Entsprechend der Einteilung diskreter Signale werden die diskreten Glieder in *digitale Übertragungsglieder* und in *Mehrpunktglieder* unterteilt.

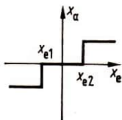


Bild 8.14.
Kennlinie eines diskreten Übertragungsgliedes

8.4.4.2. Binäre Übertragungsglieder

Definition. Binäre Übertragungsglieder sind Glieder mit nur binären Ein- und Ausgangssignalen. Die beiden möglichen Signale werden im folgenden mit 0 und L bezeichnet. Beiden Werten müssen gewisse Bereiche des Signals zugeordnet werden. Im Bild 8.15. ist angegeben, wie eine solche Zuordnung beispielsweise für Spannungen erfolgen kann.

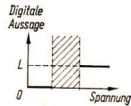


Bild 8.15.
Zuordnung von Spannungsbereichen und binärer Aussage

Bezeichnung	Beispiel	Symbol	Signalverarbeitung															
Folgeglied			<table><tr><td>x_e</td><td>x_a</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>L</td><td>L</td></tr></table>	x_e	x_a	0	0	L	L									
x_e	x_a																	
0	0																	
L	L																	
NICHT-Glied			<table><tr><td>x_e</td><td>x_a</td></tr><tr><td>0</td><td>L</td></tr><tr><td>L</td><td>0</td></tr></table>	x_e	x_a	0	L	L	0									
x_e	x_a																	
0	L																	
L	0																	
UND-Glied			<table><tr><td>x_{e1}</td><td>x_{e2}</td><td>x_a</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>L</td><td>0</td></tr><tr><td>L</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>L</td><td>L</td><td>L</td></tr></table>	x_{e1}	x_{e2}	x_a	0	0	0	0	L	0	L	0	0	L	L	L
x_{e1}	x_{e2}	x_a																
0	0	0																
0	L	0																
L	0	0																
L	L	L																
ODER-Glied			<table><tr><td>x_{e1}</td><td>x_{e2}</td><td>x_a</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>L</td><td>L</td></tr><tr><td>L</td><td>0</td><td>L</td></tr><tr><td>L</td><td>L</td><td>L</td></tr></table>	x_{e1}	x_{e2}	x_a	0	0	0	0	L	L	L	0	L	L	L	L
x_{e1}	x_{e2}	x_a																
0	0	0																
0	L	L																
L	0	L																
L	L	L																

Bild 8.16. Logische Verknüpfungselemente und gleichwertige Relaischaltungen

Logische Verknüpfungselemente. Wichtige Glieder sind das *Folgeglied* und das *NICHT-Glied* als Glieder mit einem Ein- und einem Ausgangssignal und als Glieder mit zwei Eingangssignalen und einem Ausgangssignal das *UND-Glied* und das *ODER-Glied* (Bild 8.16.). Die Bezeichnungen geben anschau-



lich die Art der Signalverarbeitung an. Beim Folgeglied sind Ein- und Ausgangssignal gleich (Relais mit Arbeitskontakt). Das Eingangssignal wird also informationsmäßig nicht verändert, meistens aber leistungsmäßig verstärkt (Starkstromrelais, Schütze usw.). Beim NICHT-Glied ist am Ausgang immer das binäre Signal vorhanden, das am Eingang *nicht* vorhanden ist (Relais mit Ruhekontakt). Das UND-Glied gibt nur dann das Signal L ab, wenn x_{e1} und x_{e2} das Signal L führen. Am Ausgang des ODER-Gliedes ist das Signal L vorhanden, falls am Eingang 1 oder am Eingang 2 (oder an beiden) das Signal L liegt. Außer mit Relais lassen sich diese Glieder auch mit Röhren, Transistoren, Magnetverstärkern, pneumatischen Verstärkern und anderen Bauelementen aufbauen.

Speicher. Häufig müssen binäre Signale gespeichert werden. Beispiele dafür sind die Speicher großer Rechenautomaten und Motorsteuerungen mit Relais, bei denen das einmal gegebene Eingangssignal mittels *Haltekontakts* gespeichert wird. Speicherzellen können aus logischen Gliedern aufgebaut werden.

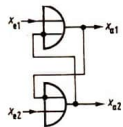


Bild 8.17. Aufbau einer Speicherzelle aus kombinierten ODER- und NICHT-Gliedern und Symbol einer Speicherzelle

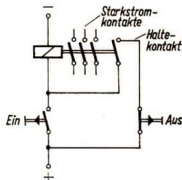


Bild 8.18. Relaischaltung mit Speicherwirkung

Ist im Bild 8.17. $x_{e1} = L$ und $x_{e2} = 0$, so ist $x_{a1} = L$. Das untere ODER-Glied gibt wegen $x_{e2} = 0$ und wegen der Verbindung vom Ausgang des oberen zum Eingang des unteren Gliedes das Signal $x_{a2} = 0$ ab. Der Wert $x_{a1} = L$ bleibt – weil das negierte $x_{a2} = 0$ für $x_{e1} = L$ ergibt, auch wenn $x_{e1} = 0$ wird – bestehen: Er wird gespeichert.

Durch $x_{e2} = L$ kann der entgegengesetzte Wert gespeichert werden.

Eine Relaisschaltung mit weitgehend ähnlichen Eigenschaften ist in Bild 8.18. angegeben. Sie stellt gleichzeitig ein typisches Beispiel für eine Steuerung dar.

Weitere Speicher sind bistabile Schaltungen mit Transistoren oder mit pneumatischen Anordnungen sowie Verdichtungen, Ferritkernspeicher, Magnetband- und Magnetplattenspeicher, Lochkarten und Lochstreifen. Auf ihre verschiedenen Eigenschaften, wie Speicherdichte, Zugriffszeit, Preis, Verhalten bei Netzspannungsausfall usw., kann hier nicht näher eingegangen werden. Näheres hierüber findet sich in der Literatur über EDV.

8.4.4.3. Mehrpunkt- und nichtlineare Glieder

Im Bild 8.19. sind Kennlinien von 2-, 3- und 5-Punkt-Gliedern dargestellt. Durch Mehrpunktglieder werden analoge Eingangssignale zu diskreten Ausgangssignalen verarbeitet.

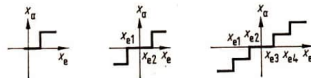


Bild 8.19. Kennlinien von 2-, 3- und 5-Punkt-Gliedern



Bild 8.20. Kontaktthermometer als Zweipunktglied

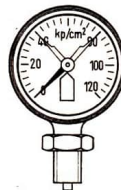


Bild 8.21. Manometer mit zwei Grenzkontakten als Dreipunktglied (1 kp cm⁻² = 98 066,5 Pa)

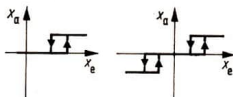


Bild 8.22. 2- und 3-Punkt-Glied mit Hysterese

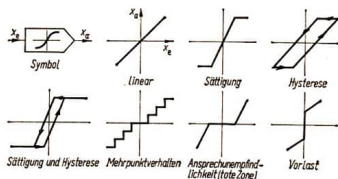


Bild 8.23. Symbol für nichtlineare Übertragungsglieder und typische nichtlineare Kennlinien

Kontaktthermometer sind *Zweipunktglieder* (Bild 8.20.). Sie lassen mit mehreren Kontakten auch den Aufbau von Mehrpunktgliedern zu. Meßinstrumente mit zwei bzw. vier Grenzkontakten sind Beispiele für 3- bzw. 5-Punkt-Glieder (Bild 8.21.).

Verläuft die statische Kennlinie für steigende Eingangssignale anders als für fallende, so spricht man von *Mehrpunktgliedern mit Hysterese* (Bild 8.22.).

Relais sind Zweipunktglieder mit Hysterese, wenn ihre Anzugs- und Abfallwerte voneinander verschieden sind.

Das Symbol für Mehrpunktglieder – allgemeiner für Übertragungsglieder mit nichtlinearer Kennlinie – ist ein Fünfeck, in das die statische Kennlinie eingetragen wird (Bild 8.23.).

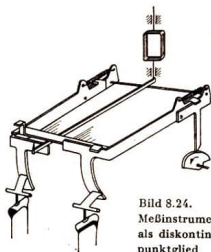


Bild 8.24. Meßinstrument mit Druckbügel als diskontinuierliches Dreipunktglied

8.4.5. Diskontinuierliche Glieder

Zu den diskontinuierlichen Gliedern gehören Meßinstrumente, deren Zeigerstellung periodisch abgetastet wird (Bild 8.24.). Diskontinuierliche Glieder werden auch mit periodisch betätigten Kontakten aufgebaut, z. B. wenn mehrere Meßstellen nacheinander auf ein Meßinstrument geschaltet werden (Bild 8.25.).

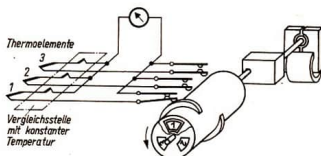


Bild 8.25. Meßstellenumschalter als diskontinuierliches Glied

8.4.6. Torglieder

Mit Torgliedern können analoge oder digitale Signale (X) in Abhängigkeit von binären Signalen (S) wahlweise weitergeleitet oder nicht weitergeleitet werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Umleitung von Signalen. Torglieder können demnach Schaltsysteme mit analogen Systemen verbinden. Die Arbeitsweise der einzelnen Tore geht aus Bild 8.26. hervor. Bild 8.27. zeigt ein Umschalttor, das als Relaischaltung ausgeführt wurde.

8.5. Der Signallaß bei der Zusammenschaltung von Gliedern

Verbindet man den Ausgang eines analogen Gliedes rückwirkungsfrei mit dem Eingang eines anderen, so entsteht ein Gebilde mit einem Ein- und Ausgang, das man wieder als Glied auffassen und z. B. durch seine Übergangsfunktion beschreiben kann. Auch bei anderen Zusammenschaltungen von zwei und mehr analogen Übertragungsgliedern



entstehen neue Glieder, deren Eigenschaften aus den Eigenschaften der einzelnen Glieder resultieren.

Man beachte hierbei besonders, daß nicht jedem Übertragungsglied unbedingt ein Bauglied oder umgekehrt jedem Bauglied ein Übertragungsglied entsprechen muß. Es kann auch ein Bauglied durch mehrere Übertragungsglieder und mehrere Bauglieder können auch durch nur ein Übertragungsglied im Signallaßplan dargestellt werden. Ebenso braucht z. B. einer Additionsstelle kein besonderes Bauglied zu entsprechen. Der Signallaßplan ist eben eine symbolische Darstellung und sagt nur etwas über die Signalverarbeitung der Geräte aus.

Im Anschluß an die Zusammenschaltung analoger Glieder wird noch die Zusammenschaltung binärer Glieder behandelt. Auf die Untersuchung weiterer Zusammenschaltungen, wie Anordnungen mit digitalen, diskontinuierlichen und anderen Gliedern, wird hier verzichtet.

8.5.1. Zusammenschaltung analoger Glieder

8.5.1.1. Signalverzweigung

Signalverzweigungen werden wie im Bild 8.28. dargestellt. Man entnimmt dem Bild, daß ein Eingangssignal auf mehrere Ausgangssignale, die die gleiche Größe wie das Eingangssignal haben, verzweigt wird.

Gerätetechnisch kann die Verzweigung z. B. eine Abzweigdose oder eine Klemmleiste sein.

8.5.1.2. Additionsstellen

Additionsstellen kennzeichnen solche Punkte des Signallaßweges, in denen mehrere Eingangssignale (vorzeichenbehaftet) zu einem Ausgangssignal addiert werden. Bild 8.29. zeigt die Darstellung im Signallaßplan. Das zu subtrahierende Signal wird durch ein Minuszeichen rechts neben dem zugehörigen Pfeil gekennzeichnet.

Da die Addition von Gleichspannungen durch Reihenschaltung der einzelnen Spannungsquellen (galvanische Trennung vorausgesetzt) erfolgen kann, entspricht der Additionsstelle häufig kein besonderes Bauglied, sondern die Addition erfolgt durch singemäße Verdrahtung der Leitungen.

8.5.1.3. Multiplikationsstellen, Divisionsstellen

Die Darstellung von Multiplikations- und Divisionsstellen ist dem Bild 8.30. zu entnehmen.

Bezeichnung	Symbol	Signalverarbeitung
Einschaltfltr		$\begin{matrix} x_e & s & x_a \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ X & 0 & 0 \\ X & L & X \end{matrix}$
		$\begin{matrix} x_e & s & x_a \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ X & 0 & X \\ X & L & 0 \end{matrix}$
		$\begin{matrix} x_{e1} & x_{e2} & s & x_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & X_1 & 0 & 0 \\ 0 & X_2 & L & X_2 \\ X_1 & 0 & 0 & X_1 \\ X_1 & 0 & L & 0 \\ X_1 & X_2 & 0 & X_1 \\ X_1 & X_2 & L & X_2 \end{matrix}$
		$\begin{matrix} x_e & s & x_{e1} & x_{e2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ X & L & 0 & X \end{matrix}$
Ausschaltfltr		
Umschaltfltr I		
Umschaltfltr II		

Bild 8.26. Symbole und Signalverarbeitung von Torgliedern

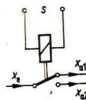


Bild 8.27. Relaischaltung, die als Umschaltfltr arbeitet



Bild 8.28. Signalverzweigungsstelle

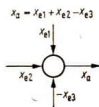


Bild 8.29. Additionsstelle



Im Signalflußplan werden die Gleichungen

$$x_a = x_{e1} \cdot x_{e2} \cdot x_{e3} \text{ bzw. } x_a = \frac{x_{e1}}{x_{e2}}$$

nicht mit angegeben, sie dienen hier nur der Erläuterung.

Die mathematischen Operationen Multiplikation und Division werden meist in speziellen Baugliedern, den Rechengliedern, ausgeführt.

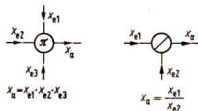


Bild 8.30. Multiplikationsglied und Divisionsglied

8.5.1.4. Reihenschaltung analoger Übertragungsglieder

Reihenschaltungen treten bei Steuerketten und in einzelnen Abschnitten von Regelkreisen auf. Bei einer Reihenschaltung ist das Ausgangssignal x_{a1} des ersten Gliedes das Eingangssignal x_{e2} des zweiten Gliedes. Arbeitet man mit Frequenzgängen, so ergibt sich der Gesamtfrequenzgang aus dem Produkt der einzelnen Frequenzgänge.

Hier sollen nur die Ergebnisse als Übertragungsfunktionen für einige wichtige Glieder angegeben werden.

Man kann sich die Entstehung der Gesamtübertragungsfunktion gut vorstellen, wenn man erst die Übertragungsfunktion des ersten Gliedes zeichnet und dann weiter überlegt, mit welcher Ausgangsgröße das zweite Glied auf diese Eingangsfunktion reagiert (Bild 8.31.). Leicht zu überblicken sind Reihenschaltungen mit P_0 -Gliedern. Zwei P_0 -Glieder mit den Übertragungsfaktoren K_{P1} und K_{P2} ergeben nämlich in Reihe geschaltet wieder ein P_0 -Glieder mit dem Übertragungsfaktor $K_P = K_{P1} \cdot K_{P2}$.

Dieses leicht einzusehende Ergebnis kann man sinnvoll benutzen, wenn zusätzlich Verzögerungsglieder auftreten. Man erhält so z. B. die Werte, die im eingeschwungenen Zustand eingenommen werden.

Die für die P_0 -, I_0 - und D_0 -Glieder gelten Gleichungen entstehen aus den Gleichungen

$$x_a P_0(t) = K_P \cdot x_e(t)$$

$$x_a I_0(t) = K_I \int_0^t x_e(\tau) d\tau$$

$$x_a D_0(t) = K_D \cdot \dot{x}_e(t)$$

und den Beziehungen für die Reihenschaltung $x_e = x_{e1}$; $x_a = x_{a2}$ und $x_{a1} = x_{e2}$ sowie der Definition der Übergangsfunktion zu $h(t) = \frac{x_a(t)}{E}$, wobei E die Höhe des Eingangssprunges war. Hierbei ist x als eine kleine Änderung aufzufassen. Den angegebenen Gleichungen ist zu entnehmen, daß ein P_0 -Glieder in einer Reihenschaltung nur quantitative und keine qualitativen Veränderungen herbeiführt.

Verzögerungsglieder 1. Ordnung werden durch die Differentialgleichung vom Typ $x_a + T \cdot \dot{x}_a = K \cdot x_e$ beschrieben. Wegen $x_a(0) = 0$ und unter Berücksichtigung des Eingangssprunges hat sie die Lösung

$$x_a(t) = K \cdot E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

Häufig ist $K = 1$. Mit den angegebenen Gleichungen und Kenntnissen in der Lösung von Differentialgleichungen lassen sich die folgenden Beispiele für Differentialgleichungen und Übergangsfunktionen untersuchen. Es sei noch vermerkt, daß bei der Reihenschaltung linearer Glieder die Reihenfolge der Glieder gleichgültig ist.

Für die durch Reihenschaltung entsprechend Bild 8.31. neu entstehenden Glieder gelten folgende Gleichungen:

P_0 -Glieder:

$$x_a(t) = K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot x_e(t); h(t) = K_{P1} \cdot K_{P2}$$

I_0 -Glieder:

$$x_a(t) = K_P \cdot K_I \int_0^t x_e(\tau) d\tau; h(t) = K_P \cdot K_I \cdot t.$$

D_0 -Glieder:

$$x_a(t) = K_P \cdot K_D \cdot \dot{x}_e(t); h(0) \rightarrow \infty; h(t) = 0 \text{ für } t > 0.$$

P -Glieder mit Verzögerung 1. Ordnung:

$$x_a(t) + T_1 \cdot \dot{x}_a(t) = K_P \cdot x_e(t)$$

$$h(t) = K_P \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

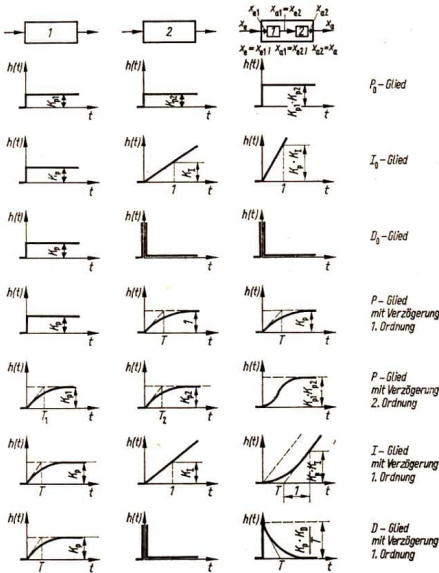


Bild 8.31.

Reihenschaltungen analoger Übertragungsglieder und Bezeichnungen der neu entstandenen Glieder. Die in die Übergangsfunktionen eingezeichneten Kennwerte deuten Möglichkeiten für ihre Bestimmung an (Identifikation)

P-Glied mit Verzögerung 2. Ordnung:

$$x_a(t) + (T_1 + T_2) \cdot \dot{x}_a(t) + T_1 T_2 \ddot{x}_a(t) = K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot x_e(t);$$

$$h(t) = K_{P1} \cdot K_{P2} \left(1 - \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2} \right).$$

I-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung:

$$x_a(t) + T \cdot \dot{x}_a(t) = K_P \cdot K_I \int_0^t x_e(\tau) d\tau;$$

$$h(t) = K_P \cdot K_I \left(t - T + T \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

D-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung:

$$x_a(t) + T_1 \cdot \dot{x}_a(t) = K_P \cdot K_D \cdot \ddot{x}_e(t);$$

$$h(t) = \frac{x_a(t)}{E} = \frac{K_P K_D}{T} e^{-\frac{t}{T}}.$$

8.5.1.5. Parallelschaltung analoger Übertragungsglieder

Haben zwei Glieder das gleiche Eingangssignal und werden ihre Ausgangssignale addiert, so spricht man von einer Parallelschaltung. Die entstehende Gesamt-Übergangsfunktion läßt sich durch vorzeichenrichtige zeichnerische Addition der beiden einzelnen Übergangsfunktionen gewinnen. Der Gesamt-Frequenzgang würde sich aus der Summe der einzelnen Frequenzgänge ergeben. Die gewählten Beispiele (Bild 8.32.) geben Übergangsfunktionen wieder, wie sie besonders bei Reglern auftreten. Für PD-Glieder ist auch der Ausdruck *Vorhaltglieder* gebräuchlich. (Bei Erregung mit sinusförmigen Eingangssignalen eilt für nicht zu hohe

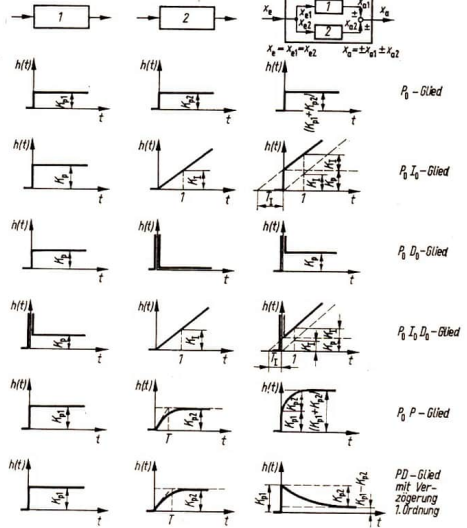


Bild 8.32.
Parallelschaltungen analoger Übertragungsglieder und Bezeichnung der neu entstandenen Glieder

Frequenzen ihr Ausgangssignal dem Eingangssignal in der Phase voraus.)

Bei den ersten fünf Beispielen in Bild 8.32. gilt $x_a = x_{a1} + x_{a2}$. Nur im letzten Beispiel ist $x_a = x_{a1} - x_{a2}$. Die folgenden Gleichungen beschreiben die neu entstandenen Glieder.

P_0 -Glied:

$$x_a(t) = (K_{P1} + K_{P2}) \cdot x_e(t); \quad h(t) = K_{P1} + K_{P2}$$

$P_0 I_0$ -Glied:

$$T_I = \frac{K_P}{K_I} = \text{Integralzeit};$$

$$x_a(t) = K_P \left[x_e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t x_e(\tau) d\tau \right];$$

$$h(t) = K_P + K_I \cdot t = K_P \left(1 + \frac{t}{T_I} \right).$$

$P_0 D_0$ -Glied:

$$T_D = \frac{K_D}{K_P} = \text{Differentialzeit};$$

$$x_a(t) = K_P [x_e(t) + T_D \dot{x}_e(t)].$$

$P_0 I_0 D_0$ -Glied:

$$x_a(t) = K_P \left[x_e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t x_e(\tau) d\tau + T_D \cdot \dot{x}_e(t) \right];$$

$$h(t) \rightarrow \infty; \quad h(t) = K_P \left(1 + \frac{t}{T_I} \right) \text{ für } t > 0$$

$P_0 P$ -Glied:

$$x_a(t) + T \cdot \dot{x}_a(t) = (K_{P1} + K_{P2}) x_e(t) + K_{P1} \cdot T \cdot \dot{x}_e(t);$$

$$h(t) = K_{P1} + K_{P2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

PD-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung:

$$x_a(t) + T \cdot \dot{x}_a(t) = (K_{P1} - K_{P2}) x_e(t) + K_{P1} \cdot T \cdot \dot{x}_e(t);$$

$$h(t) = K_{P1} - K_{P2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

8.5.1.6. Rückführschaltung

Eine Rückführschaltung besteht grundsätzlich aus einem Vorwärtszweig und einem



8.5.2. Zusammenschaltung binärer Glieder (Schaltalgebra)

Die schon *Aristoteles* bekannte Aussagenlogik operiert mit den beiden Aussagen wahr (w) und falsch (f) und gibt den Wahrheitswert von Urteilen an, die auf Grund anderer Aussagen gefällt werden [1], [8]. *G. Boole* hat diese traditionelle Aussagenlogik in ein mathematisches Gewand gekleidet. Bei der Untersuchung von Relais-schaltungen stellte sich heraus, daß aus dieser *Booleschen Algebra* eine algebraische Methode zur Aufstellung von Kontaktschaltungen entwickelt werden kann. In ihrer heutigen Form ermöglicht die Schaltalgebra, umfangreiche und komplizierte Schaltungsprobleme – wie sie u. a. bei Rechenmaschinen auftreten – zu beschreiben.

Zur Verknüpfung zwischen zwei Eingängen und einem Ausgang sind prinzipiell 16 verschiedene Glieder möglich. Man kommt jedoch mit weniger Gliedern, z. B. mit dem UND-, ODER-, Folge- und NICHT-Glied, aus.

Folge-Glied;	NICHT-Glied;	UND-Glied;
$x_{a1} = x_e$	$x_{a2} = \bar{x}_e$	$x_{a3} = x_{e1} \wedge x_{e2}$

ODER-Glied;	
$x_{a4} = x_{e1} \vee x_{e2}$	$x_{a1} = x_e$ lies x_{a1} ist gleich x_e ; $x_{a2} = \bar{x}_e$ lies x_{a2} ist nicht gleich x_e ; $x_{a3} = x_{e1} \wedge x_{e2}$ lies x_{a3} ist gleich x_{e1} und x_{e2} ; $x_{a4} = x_{e1} \vee x_{e2}$ lies x_{a4} ist gleich x_{e1} oder x_{e2} .

Diese Gleichungen sollen die entsprechenden Glieder beschreiben, d. h., es muß also gelten (siehe Bild 8.16.):

Folge-Glied	NICHT-Glied	UND-Glied	ODER-Glied
$0 = 0$; $L = L$;	$0 = \bar{L}$; $L = \bar{0}$;	$0 = 0 \wedge 0$; $0 = 0 \wedge L$; $0 = L \wedge 0$; $L = L \wedge L$;	$0 = 0 \vee 0$; $L = 0 \vee L$; $L = L \vee 0$; $L = L \vee L$;

Weiter gilt allgemein, wie man mit Verwendung obiger Gleichungen und nach Einsetzen von 0 und L für X feststellen kann:

$$\begin{aligned} 0 &= 0 \wedge X; X = 0 \vee X \\ X &= L \wedge X; L = L \vee X \\ X &= X \wedge X; X = X \vee X \\ 0 &= X \wedge \bar{X}; L = X \vee \bar{X} \end{aligned}$$

Wie bei üblichen algebraischen Gleichungen gilt das Vertauschungsgesetz

$$X_1 \wedge X_2 = X_2 \wedge X_1 \text{ und } X_1 \vee X_2 = X_2 \vee X_1.$$

Das Verbindungsgesetz erhält folgende Form:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge (X_2 \wedge X_3) &= (X_1 \wedge X_2) \wedge X_3 = \\ &= X_1 \wedge X_2 \wedge X_3; \\ X_1 \vee (X_2 \vee X_3) &= (X_1 \vee X_2) \vee X_3 = \\ &= X_1 \vee X_2 \vee X_3. \end{aligned}$$

Ungewohnt erscheint das Verteilungsgesetz:

$$\begin{aligned} X_1 \wedge (X_2 \vee X_3) &= (X_1 \wedge X_2) \vee (X_1 \wedge X_3); \\ X_1 \vee (X_2 \wedge X_3) &= (X_1 \vee X_2) \wedge (X_1 \vee X_3). \end{aligned}$$

Für Vereinfachungen können folgende Gleichungen vorteilhaft benutzt werden:

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 \vee \bar{X}_2 &= \overline{X_1 \wedge X_2}, & X_1 \wedge (X_1 \vee X_2) &= X_1, \\ \bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 &= \overline{X_1 \vee X_2}, & X_1 \vee (X_1 \wedge X_2) &= X_1. \end{aligned}$$

Ein kurzes Beispiel möge die Anwendung erläutern: Es bestehe die Aufgabe, mit drei (mehrpoleigen) Tasten eine Lampe zu schalten. Die Lampe soll dann und nur dann leuchten, wenn die 1. und 2. oder die 1. und 3. Taste betätigt werden. Man stellt zuerst die Wertetabelle auf.

X_{e1}	X_{e2}	X_{e3}	X_a
0	0	0	0
0	0	L	0
0	L	0	0
0	L	L	0
L	0	0	0
L	0	L	L !
L	L	0	L !
L	L	L	0

Übersicht 8.34.

Die gesuchte Schaltfunktion ergibt sich, indem für die Zeilen, in denen $X_a = L$ ist,

- für $X_{ey} = L$ die Größe X_{ey} ;
- für $X_{ey} = 0$ die Größe \bar{X}_{ey} gesetzt wird;
- die X_{ey} und \bar{X}_{ey} der Zeilen durch \wedge und
- die Zeilen durch \vee verbunden werden.

Im Beispiel ist demnach

$$X_a = (X_{e1} \wedge \bar{X}_{e2} \wedge X_{e3}) \vee (X_{e1} \wedge X_{e2} \wedge \bar{X}_{e3}).$$

Diese Funktion kann man noch kürzen:

$$X_a = X_{e1} \wedge [(X_{e2} \wedge \bar{X}_{e3}) \vee (\bar{X}_{e2} \wedge X_{e3})].$$

Die erhaltene Schaltfunktion entspricht dem im Bild 8.35. angegebenen Signalflußplan, den man sofort nach der Funktion zeichnen kann. Mit Tasten ergibt sich die im Bild 8.36. dargestellte Lösung. Man beachte insbesondere, daß die Lampe nicht leuchtet, wenn alle 3 Tasten betätigt werden.

Wer häufiger mit Relais-schaltungen arbeitet, kann die Schaltung auch sofort nach der Wertetabelle zeichnen und dann noch weiter vereinfachen (Bild 8.37.). Die hier-

bei benutzte Symbolik kann auch dazu verwendet werden, die weiter oben angegebenen Gesetze zu veranschaulichen.

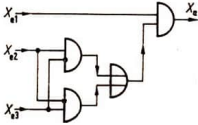


Bild 8.35. Signalflußplan für die Aufgabe nach Übersicht 8.34.

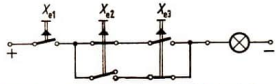


Bild 8.36. Lösung zur Übersicht 8.34. mit Tasten

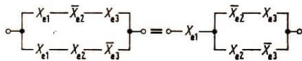


Bild 8.37. Symbolische Schaltung; direkt aus der Übersicht 8.34. gewonnen

8.6. Meß-, Steuer- und Regelgeräte

An die Geräte der *BMSR*-Technik werden hohe Anforderungen gestellt. Bei rauen Betriebsbedingungen (Stoß, Schlag, Rütteln), großen Temperaturgegensätzen, Einwirkung aggressiver Dämpfe und schwankender Hilfsenergie (Netzspannung) sollen gute Geräte nach Möglichkeit mehrere Jahre fehlerfrei und mit minimaler Wartung ohne wesentliche Änderung ihrer Parameter arbeiten. Wesentliche Fortschritte in der Betriebssicherheit wurden in der Pneumatik durch Einführung des Niederdrucksystems [25] und in der Elektrotechnik durch die Verwendung von hochintegrierten Halbleiterschaltungen erzielt. Eine Vereinfachung der Herstellung, Wartung und Reparatur der Geräte konnte durch die Aufteilung in Bausteine, wie Verstärker, Versorgungsteile, Zeitglieder (insbesondere zur Erzeugung des P-, I-, D-Verhaltens) usw., und durch die konsequente Standardisierung erreicht werden. Im folgenden kann nur ein Überblick über die Gerätetechnik gegeben werden.

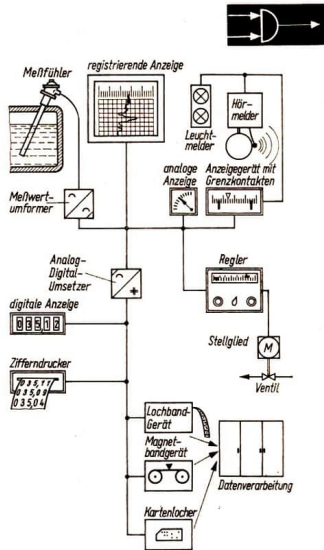


Bild 8.38. Gewinnung und Weiterverarbeitung von Meßwerten

Umfassende Angaben finden sich in [1], [6], [7], [21], [23], [26].

8.6.1. Betriebsmeßtechnik

8.6.1.1. Wesen der Betriebsmeßtechnik

Einen wesentlichen Teil ihrer Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten der Materie verdankt die Menschheit den Messungen. Wissenschaftliche Erkenntnisse und hohe Produktivität sind untrennbar mit einer hochentwickelten Meßtechnik verbunden. Die Betriebsmeßtechnik soll Informationen über den Produktionsprozeß an den Menschen und an informationsverarbeitende Geräte weiterleiten. Im Vordergrund steht daher die Abbildung der zu messenden Größe in eine andere, leichter zu verarbeitende Größe. Meßwertumformer (Bild 8.38.) geben deswegen vorzugsweise Spannung, Strom oder Druck als dem Meßwert proportionale Aus-



gangsgrößen ab ([12], [13], [14], [15], [16], [17]). Das Messen als Vergleichen mit einer Einheit behält seine Bedeutung dort, wo Austauschbeziehungen auftreten. Als Beispiele dafür seien genannt: Kauf und Verkauf von Massen, Volumina usw., die Berücksichtigung von Stoffkonstanten oder Reaktionsparametern, die Einhaltung von Sicherheitsbestimmungen u. a. m. Zur Zeit können innere Prozeßgrößen, wie z. B. das Entwicklungsstadium einer chemischen Reaktion, nur ungenügend gemessen werden. Desgleichen ist es schwierig, summarische Größen, wie z. B. die Qualität eines produzierten Materials, sofort und fortlaufend zu bestimmen. Man beschränkt sich daher auf die Erfassung wesentlicher äußerer Prozeßgrößen, wie Spannung, Strom, Druck, Temperatur, Füllstand, Durchfluß, Stückzahl, Abmessung, Weg usw. Diese Größen sollen angezeigt, registriert, gezählt, verrechnet, an datenverarbeitende Anlagen und an Steuer- und Regleinrichtungen weitergegeben werden. Bei Überschreitung von Grenzzuständen müssen gegebenenfalls optische und akustische Alarmsignale ausgelöst, eventuell sogar Gegenmaßnahmen, wie Abschalten usw., vorgenommen werden. Mehrmalige Weiterverarbeitung des Meßwertes legt die Umsetzung des analogen Signals in ein digitales nahe, weil die Weiterverarbeitung digitaler Signale fehlerfrei erfolgen kann. Die Digitaltechnik vereinfacht auch die Speicherung und automatische Aufbereitung größerer Informationsmengen, wie sie bei Prozeßrechnern auftreten, mit denen auch größere Prozesse vollautomatisch geführt werden können [12], [13].

8.6.1.2. Ausschlagverfahren, Kompensationsverfahren

Auf Seite 228 ff. wurde bereits auf die Messung elektrischer Spannungen eingegangen. Im folgenden soll nur der grundsätzliche Unterschied zwischen dem *Ausschlagverfahren* und dem *Kompensationsverfahren* erläutert werden.

Die Spannungsmessung mit dem Drehspulinstrument gehört zu den *Ausschlagverfahren*.

ren: Hier wird die zu messende physikalische Größe über die Verformung einer Feder in eine anzeigbare Größe, nämlich eine Länge, umgeformt, weil das Auge die so gegebenen analogen Informationen gut wahrnehmen kann. Der Spannungsquelle wird zur Erzeugung dieses Ausschlages Energie entzogen. Das hat einen vom Innenwiderstand der Quelle abhängigen Meßfehler zur Folge. Längere Zuleitungen erhöhen den Innenwiderstand. Sie lassen ihn auch temperaturabhängig werden. Dazu kommen noch der unvermeidliche Fehler des Meßinstrumentes sowie Ablesefehler, so daß sich insgesamt ein relativ großer Fehler ergeben kann.

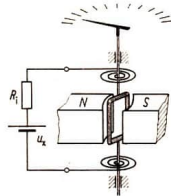


Bild 8.39.a Spannungsmessung nach dem Ausschlagverfahren;

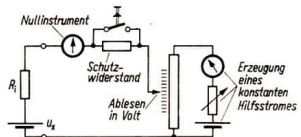


Bild 8.39.b Spannungsmessung nach dem Kompensationsverfahren

Anders beim *Kompensationsverfahren*: Ein Widerstand kann mit bedeutend höherer Genauigkeit als mit Meßinstrumenten nach dem Ausschlagverfahren hergestellt werden. Das verwendete Nullinstrument muß lediglich empfindlich, braucht aber nicht genau zu sein. Und das wichtigste: Im abgeglichenen Zustand wird der Quelle kein Strom, also auch keine Energie entzogen, d. h., der Innenwiderstand kann die Messung nicht



verfälschen. Dem Nachteil des etwas schwierigen und umständlichen Abgleichs begegnet man durch automatischen Abgleich mit Hilfe einer Regelung. Da man diese Geräte auch so aufbauen kann, daß sie einen der Spannung proportionalen, gut weiterleitbaren Strom abgeben, hat das Kompensationsverfahren an Bedeutung gewonnen (siehe Bild 8.41.). Das gilt besonders für die Messung kleiner Spannungen, aber auch sinngemäß für die Messung von Kräften, Wegen und anderen Größen.

8.6.1.3. Aufbau einer Meßeinrichtung

Viele Meßeinrichtungen kann man nach dem im Bild 8.40. gezeigten Schema unterteilen. Allerdings läßt sich nicht jede Meßeinrichtung in dieses Schema einordnen. Zum Beispiel können für die Messung von Spannungen häufig Meßfühler und Meßwandler entfallen. Vorteilhaft ist die Festlegung eines einheitlichen Ausgangssignals für Meßwandler, wie etwa eines Spannungseinheitssignals $0 \dots 10\text{ V}$, eines pneumatischen Druckbereiches von $20 \dots 100\text{ kPa}$, da dann weniger unterschiedliche Geräte und Meßinstrumente erforderlich sind. Dadurch werden Reparatur und Lagerhaltung von Geräten wesentlich vereinfacht.

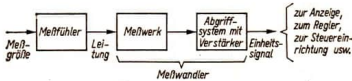


Bild 8.40. Aufbau einer Meßeinrichtung

Bild 8.40. stellt eine Reihenschaltung von Gliedern dar. Auf seinem Weg von der Meßgröße bis zum Einheitssignal kann das übermittelte Signal von mehreren verschiedenen physikalischen Größen getragen werden. Bevorzugt werden auf diesen Signalwegen Spannungen, Drücke, Wege und Kräfte. Daher können die Beispiele für einzelne Meßgrößen oft weitgehend verallgemeinert auch auf andere Abschnitte des Signalflußweges sinngemäß übertragen werden. Man achte darauf besonders bei der Betrachtung der angegebenen Meßwandler.

8.6.2. Meßanordnungen

Es gibt Meßverfahren für eine Vielzahl von Meßgrößen. Dabei sind auch für die einzelnen Meßgrößen oft noch mehrere Meßver-

fahren in Gebrauch. Die folgenden Beispiele erläutern die wichtigsten Meßverfahren und Anordnungen für einige ausgewählte Meßgrößen, siehe auch [12], [13].

8.6.2.1. Messung elektrischer Größen

Die Messung elektrischer Größen kann einfach und genau geschehen, so daß viele nichtelektrische Meßgrößen erst in elektrische umgewandelt und dann gemessen werden. Zur Messung von Leistung, Leistungsfaktor, Frequenz und anderen elektrischen Größen siehe Abschnitt 7. Elektrotechnik.

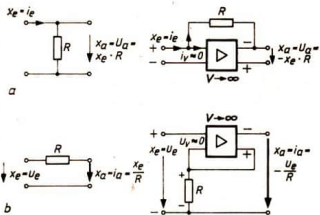


Bild 8.41. Umformung von Strom in Spannung (a) und von Spannung in Strom (b) mit Widerstand oder Verstärkerschaltung (idealisiert)

Hier soll nur auf die Umformung von elektrischen Strömen in Spannungen und umgekehrt eingegangen werden. Mit den Kenntnissen aus dem Abschnitt 7.1.3. ist die Umformung mit Widerständen (Bild 8.41.) ohne weiteres zu verstehen. Diese Schaltungen setzen folgende Anpassungsbedingungen voraus:

- Die Stromquelle und der belastende Verbraucher müssen einen großen Widerstand aufweisen: $R_1 \gg R$, $R_a \gg R$.
- Die Spannungsquelle und der belastende Verbraucher müssen einen kleinen Widerstand aufweisen: $R_1 \ll R$, $R_a \ll R$.

Diese Bedingungen sind nicht immer einzuhalten, da z. B. der Quellwiderstand (R_1) eines Meßumformers und der Eingangswiderstand (R_a) eines Reglers schon vorgegeben sein können. Aktive Schaltungen mit Operationsverstärkern, die bei besonderen Anforderungen auch zerhackerstabilisiert sein können und heute meist als integrierte Schaltungen ausgeführt sind, eröffnen hier einen Ausweg. Solche Verstärker können Verstärkungsfaktoren von 10^5 und mehr haben. Daher kann man wegen des leichteren Verständnisses annehmen, daß Eingangsstrom und Eingangsspannung dieser Verstärker verschwinden. Damit



ergibt sich aus dem Bild 8.41.a nach dem Knotenpunktsatz $i_e = \frac{u_a}{R}$ und im Fall b nach dem Maschensatz $u_e = -i_a \cdot R$, woraus die im Bild angegebenen proportionalen Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen folgen. Außerdem sind bei diesen Rückkopplungsschaltungen idealisiert im Fall a Ein- und Ausgangswiderstand 0 und im Fall b unendlich. Das bedeutet im Fall b, daß der Ausgangsstrom in weiten Grenzen vom Belastungswiderstand unabhängig ist. Man spricht deswegen von einem *eingepägten Strom*. Eingepägte Ströme sind bevorzugte Einheitssignale. Der Einfluß langer Leitungen ist bei Verwendung eines eingepägten Stromes gering, da praktisch fast immer der Leitungswiderstand genügend klein und der Isolationswiderstand genügend groß gehalten werden können.

8.6.2.2. Messung von Wegen (Verschiebungen) und Winkeln

Fast alle älteren Meßgeräte haben die Stellung eines Zeigers als Ausgangsgröße. Das Anbringen von Grenzkontakten an solche Meßgeräte stellt die einfachste Art der Umformung in ein gut weiterleitbares elektrisches Signal dar (siehe Bild 8.21.). Wegmessungen sind heute durch Meßpotentiometer, induktive Geber, fotoelektrische und Hochfrequenzabgriffssysteme vervollkommen worden. Die Bilder 8.42. bis 8.47. stellen Umformungen von Wegen und Winkeln in elektrische Größen dar, wie sie für die Erfassung der Stellung von Zeigern, Ventilen, Werkstücken, aber auch für Dicken- und Durchgangsmessungen verwendet werden.

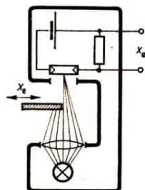


Bild 8.42.
Wirkungsweise einer Lichtschranke mit Fotowiderstand

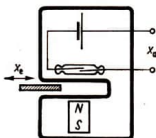


Bild 8.43.
Wirkungsweise eines magnetischen Grenzsalters

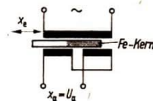


Bild 8.44.
Induktiver Geber für Wege und Meßschaltung eines induktiven Weggebers. Die Kopplung zwischen den Spulen ist von der Strecke (x_e) abhängig

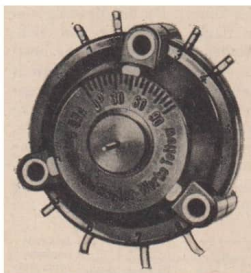


Bild 8.45. Induktiver Geber für Winkel und Meßschaltung eines induktiven Winkelgebers. Bei unsymmetrischer Lage des Korns (x_e) entsteht die Spannung (x_a)

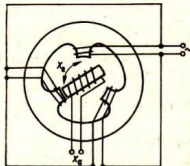


Bild 8.46. Meßschaltung eines Drehmelders zur Umformung von Winkeln in Spannungen

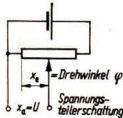


Bild 8.47. Meßpotentiometer (Gepo) und Meßschaltung eines Potentiometers

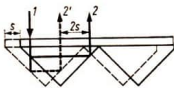
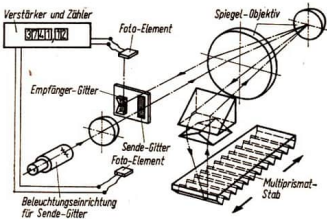


Bild 8.48. Positioniereinrichtung für Werkzeugmaschinen, Prinzipskizze des „Multi-Prismat“ der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, und Zusammenhang zwischen der Verschiebung des Lichtstrahls und der Leiste. Es erfolgt eine Verschiebung des Lichtstrahls um $2s$ bei Verschiebung der Prismenleiste um s

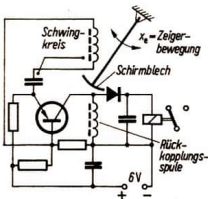


Bild 8.49. Grenzkontakt mit Hochfrequenzabtastung. Das Schirmblech unterbricht die HF-Schwingung, und das Relais fällt ab

Bild 8.48. zeigt eine Meßeinrichtung, mit der die Stellung von Werkzeugschlitten u. ä. auf $0,01 \text{ mm}$ genau digital angezeigt wird. Bei Bewegung der Prismenleiste bewegt sich das Bild des Sendegitters mit der doppelten Geschwindigkeit auf dem Empfangsgitter. Dadurch entstehen Hell-Dunkel-Folgen, die mit Fotoelementen aufgenommen, dann verstärkt und gezählt werden. Das Empfangsgitter besteht aus zwei um eine viertel Periode versetzten Teilgittern, dadurch ist eine Vor- und Rückwärtszählung möglich (nach ATM-Blätter 2.64.).

8.6.2.3. Kraftmessung

Kräfte können elastische Körper verformen. Durch geeignete Ausbildung der Körper lassen sich linear von der Kraft abhängige Wege erreichen (Bild 8.50.). Bei größeren Kräften sind die Wege aus Festigkeitsgründen meist klein. Sie können dann durch auf das federnde Material geklebte Dehnungsmeßstreifen erfaßt werden (Bild 8.51.). Dabei wird die Abhängigkeit des Drahtwiderstandes von der Dehnung ausgenutzt. Ein hydraulisches Meßverfahren ist in Bild 8.52. dargestellt. Kleinere Kräfte können genauer mit dem Kraftkompensationsverfahren gemessen werden, weil Nichtlinearitäten von Federn usw. hierbei kaum einen Einfluß haben. Bild 8.53. zeigt einen pneumatischen Kraftkompensator.

Wir untersuchen seine Wirkungsweise mit einem Eingangsprung: Wird x_e sprunghaft etwas vergrößert, schließt sich die Steuerdüse, der Druck p_a steigt an. Dadurch erhöht sich die auf die Membran ausgeübte Kraft so lange, bis am drehbar gelagerten Balken Drehmomentgleichheit herrscht (Rückführung!). Dann ist $x_e = F \sim x_a = p_a$.

Die zur Aussteuerung des pneumatischen Verstärkers nötige Bewegung der Prallplatte beträgt nur einige hundertstel Millimeter (siehe Seite 315).

8.6.2.4. Druckmessung

Drücke werden meist durch die Kraft, die sie auf eine definierte Fläche ausüben, gemessen, d. h., Druckmessungen werden auf Kraftmessungen zurückgeführt und wie diese durch Verformen von Federn (Ausgangsschlagsmessung mit Weg als Ausgangssignal, Bilder 8.54. bis 8.56., 8.61., 8.62.) oder durch Kraftkompensation (Bild 8.60.) erfaßt. Bei U-Rohr- und Schrägrohrmanometern wird die kompensierende Kraft durch die Flüssigkeitssäule aufgebracht.

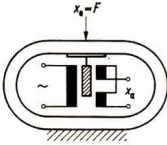
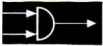


Bild 8.50. Kraftmessung mit federndem Stahlbügel und induktivem Geber

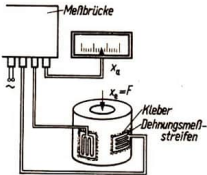


Bild 8.51. Kraftmessung mit Dehnungsmeßstreifen

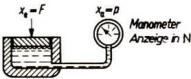


Bild 8.52. Kraftmessung durch Druckmessung

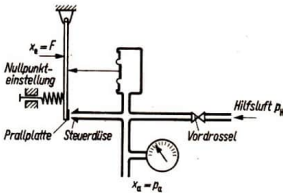


Bild 8.53. Kraftkompensation mit pneumatischem Verstärker



Bild 8.54. Kolbenmanometer zur Druckmessung



Bild 8.55. Plattenfedermanometer zur Druckmessung



Bild 8.56. Rohrfedermanometer zur Druckmessung

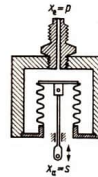


Bild 8.57. Druckmeßwertgeber mit Metallfaltenbalg



Bild 8.58. Ringwaage zur Druckmessung

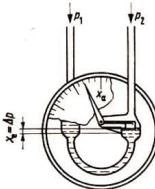


Bild 8.59. U-Rohr-Manometer zur Druckmessung

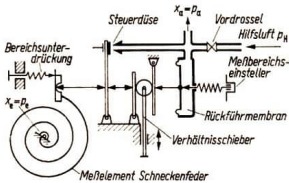
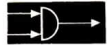


Bild 8.60. Druckmessung mit Schneckenfeder

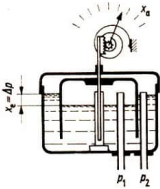


Bild 8.61. Tauchglockenmanometer zur Druckmessung

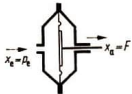


Bild 8.62. Membranmeßwerk zur Druckmessung

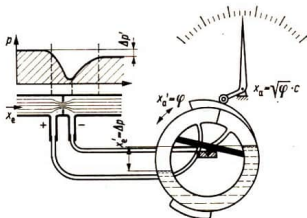


Bild 8.63. Durchflußmessung mit radizierender Ringwaage

8.6.2.5. Durchfluß- und Mengenmessung

Als Durchfluß bezeichnet man die je Zeiteinheit durch eine Leitung fließende Masse (Massendurchfluß) oder das entsprechende Volumen (Volumendurchfluß). An Stelle des Durchflusses wird oft die Strömungsgeschwindigkeit gemessen, die mit dem Durchfluß über den Leitungsquerschnitt zusammenhängt. Auf die durchgeflossene Menge kann durch Integrieren des Durchflusses (z. B. mit Zählwerken o. ä.) geschlossen werden. Mehrere grundsätzliche Meßverfahren stehen zur Verfügung:

1. Durch eine (meist als Normblende ausgeführte) Verengung in der Leitung entsteht eine Druckdifferenz, die dem Quadrat des Durchflusses proportional ist. Diese Druckdifferenz wird häufig mit radizierenden Ringwaagen gemessen (Bild 8.63.).
2. Bestimmung des Durchflusses aus der Kraft angeströmter Körper. Hierzu gehören das Flügelrad (Woltmannzähler, Bild 8.64.) und Schwebekörper in konischen Rohren (Bild 8.65.). Bei letzteren stellt sich zu jedem Durchfluß eine andere Schwebekörperhöhe ein. Die Stellung des Schwebekörpers kann induktiv oder magnetisch abgetastet werden.
3. Zählung abgeteilter Volumina, z. B. durch Wälzkolbenzähler (Bild 8.67.). Jeder Umdrehung entspricht ein bestimmtes durchgelassenes Volumen. Die Drehzahl ist dem Durchfluß proportional.
4. Tritt eine leitende Flüssigkeit durch ein isoliertes Rohr, in dem senkrecht zum Vektor (\mathbf{v}) der Geschwindigkeit ein Magnetfeld (\mathbf{B}) besteht, so wird im Leiter eine geschwindigkeitsproportionale Spannung induziert, die mit Elektroden abgenommen werden kann (Bild 8.66.).

8.6.2.6. Temperaturmessung

Folgende physikalische Effekte werden bevorzugt ausgenutzt: Temperaturabhängigkeit der beim Berühren zweier Metalle entstehenden Spannung (Thermoelement); Temperaturabhängigkeit des elektrischen



Widerstandes (Widerstandsthermometer, Halbleiter); Längen- und Volumenänderung erwärmter Stoffe (Ausdehnungsstab, Bimetall, Flüssigkeitsthermometer, Gasthermometer) und Abhängigkeit des Dampfdruckes einer Flüssigkeit von der Temperatur der Flüssigkeit (Tensionsthermometer) (Bilder 8.68. bis 8.74.).

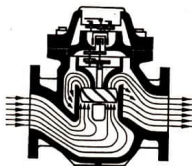


Bild 8.64. Woltmannzähler zur Durchflußmessung

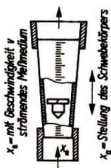


Bild 8.65. Durchflußmessung mit Schwebekörper

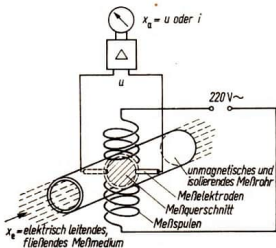


Bild 8.66. Prinzipbild eines induktiven Durchflußmessers

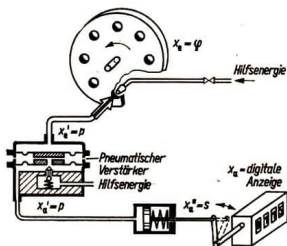


Bild 8.67. Pneumatische Zählvorrichtung für Wälzkolbenzähler und Wälzkolbenzähler



Bild 8.68. Gehäuseausführung für Thermoelemente und Widerstandsthermometer

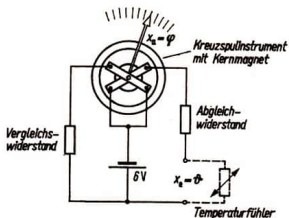
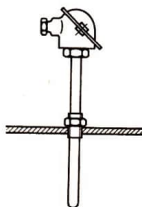


Bild 8.69. Widerstandsthermometer und Kreuzspulinstrument

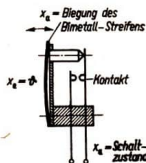
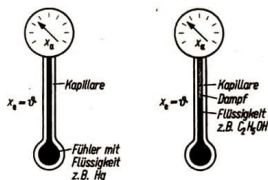


Bild 8.70. Bimetallkontakt (Zweipunktglied)



Bilder 8.71. und 8.72. Flüssigkeitsausdehnungsthermometer und Tensionsthermometer

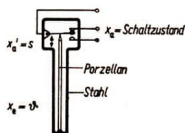


Bild 8.73. Ausdehnungsstab (Dreipunktglied)



Bild 8.74. Quecksilber-Kontaktthermometer

8.6.2.7. Füllstandsmessung

Die Messung der Höhe eines Flüssigkeitsspiegels kann auf eine Wegmessung (Schwimmer, Bild 8.75.), eine Kraftmessung (Auftriebskörper, Bild 8.76.) oder eine Druckmessung (Bilder 8.77., 8.78.) zurückgeführt werden.

8.6.2.8. Gasanalyse

Für die Gasanalyse werden physikalische Verfahren bevorzugt. Das O_2 -Meßgerät im Bild 8.79. nutzt z. B. die hohe und temperaturabhängige Suszeptibilität aus, die für Sauerstoff charakteristisch ist.

Durch die Heizwicklung des mittleren Röhrchens entsteht ein Temperaturgefälle. Dieses und das Magnetfeld bewirken eine Querströmung des Sauerstoffs, die die beiden Heizwicklungen ungleichmäßig abkühlt. Infolge der Temperaturänderungen der Heizwicklungen ändern sich auch ihre Widerstände, und es fließt ein Strom durch das Instrument. Das Meßinstrument kann direkt in Volumenprozent geeicht werden. Beim Infralyt (Bild 8.80.) wird die unterschiedliche Infrarotabsorption von Gasen wirksam.

Das von zwei Strahlern emittierte Spektrum wird durch eine rotierende Blende periodisch unterbrochen und dann einer Meß- und einer Vergleichsküvette zugeleitet. Beim Passieren der Küvetten werden charakteristische Spektrallinien absorbiert. Daraus resultiert eine unterschiedliche Erwärmung und Ausdehnung der beiden Gasvolumina des Empfängers. Die (periodischen) Druckänderungen zwischen beiden Kammern des Empfängers verformen eine dünne Metallmembran, die als Platte eines Kondensators ausgeführt ist. Mit einer elektronischen Schaltung können die Kapazitätsänderungen in eine elektrische Gleichspannung umgeformt werden.

8.6.2.9. Drehzahlmessung

Elektrisch können Drehzahlen mit Tachogeneratoren gemessen werden. Frequenz und Höhe der abgegebenen Spannung sind der Drehzahl proportional (Bild 8.81.). Der pneumatische Drehzahlmesser (Bild 8.82.) stellt im Prinzip eine Pumpe dar.

In die Fangdüse wird die komprimierte Luft „gespritzt“. Diese kann nicht so schnell entweichen, und es verbleibt ein Überdruck, der von der Frequenz der Hübe, also von der Drehzahl, abhängt.

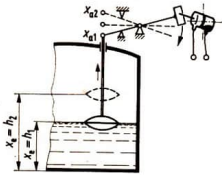
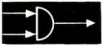


Bild 8.75. Zweipunkt-Schwimmerregler (Füllstandschalter)

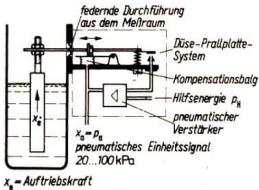


Bild 8.76. Füllstandmessung mit Auftriebskörper

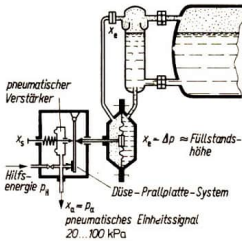


Bild 8.77. Füllstandmessung nach dem Differenzdruckverfahren

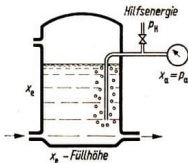


Bild 8.78. Niveaumessung nach dem Perltverfahren

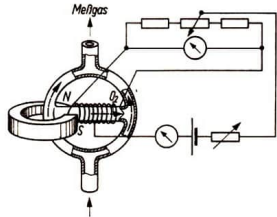


Bild 8.79. Meßprinzip eines \$O_2\$-Meßgerätes

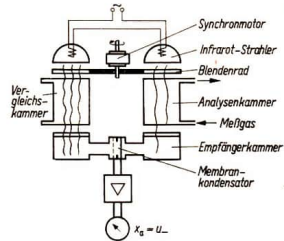


Bild 8.80. Meßprinzip der Gasanalyse durch Infrarotabsorption

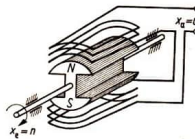


Bild 8.81. Tachogenerator zur Drehzahlmessung



Bild 8.82. Pneumatischer Drehzahlgeber



8.6.3. Einstellglieder

Einstellglieder stellen die Verbindung vom Menschen zur Anlage her. Mit ihnen können Befehlssignale, wie Sollwerte und geforderte Schaltzustände, in den Prozeß geleitet und Eigenschaften einzelner Glieder, wie Empfindlichkeit, Verstärkung, Zeitkonstanten usw., verändert werden. Zu den Einstellgliedern zählen elektrische und pneumatische Schalter, Hand-Automatik-Schalter, Tasten, Drehwiderstände, Drehtransformatoren und anderes mehr.

8.6.4. Verstärker

Als Verstärker bezeichnet man Bauglieder, in denen große Ausgangsleistungen von kleinen Eingangsleistungen gesteuert werden. Verstärker benötigen daher stets Hilfsenergie. Außer elektrischen Verstärkern (s. S. 264), zu denen auch Relais usw. als Schaltverstärker gehören, gibt es auch mechanische (z. B. Kupplungen), mechanisch-elektrische, pneumatische (Bild 8.84.), hydraulische und andere Verstärker, siehe auch [1], [8]. Verstärker werden benutzt, um Signale nach der Informationsverarbeitung auf die für die Ausführung von Befehlen erforderlichen Leistungen zu bringen, um schwache Meßsignale in Einheitssignale umzuformen und als P-Glieder mit großem Übertragungsfaktor, um mit geeigneten Rückführungen ein bestimmtes Zeitverhalten zu erreichen (s. 8.5.1.6.).

8.6.4.1. Pneumatische Verstärker

In der Anordnung nach Bild 8.83. genügen bereits kleine Wege (s) der Prallplatte, um relativ große Druckänderungen (p_a) herbeizuführen. Es liegt demnach ein Verstärker mit kleinen Wegen und Kräften als Eingangsgrößen und Druckänderungen als Ausgangsgröße vor. Diese Druckänderungen kann man mit dem in Bild 8.84. dargestellten Drosselverstärker noch weiter verstärken. Die Kennlinie (Bild 8.83.) zeigt, daß schon kleine Druckdifferenzen an der Membrane ausreichen, um die Ventile des Ver-

stärkers zu steuern. Solche pneumatischen Verstärker sind für Regelungs- und Steuerungszwecke vielseitig anwendbar, robust, preiswert, betriebssicher und haben demzufolge eine große Bedeutung (Bild 8.85.).

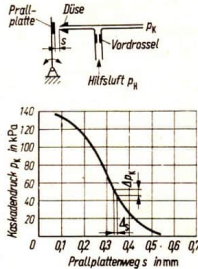


Bild 8.83. Wirkungsprinzip Düse-Prallplatte und Kennlinie

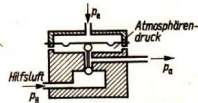


Bild 8.84. Drosselverstärker

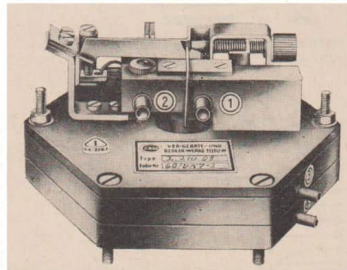


Bild 8.85. Pneumatischer Verstärker des VEB Geräte- und Regier-Werke Teltow

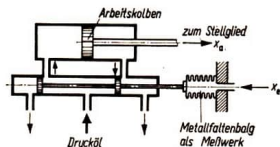


Bild 8.86. Doppelsteuerkolben mit Meßwerk und Arbeitskolben

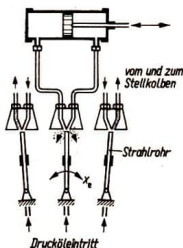


Bild 8.87. Verschiedene Arbeitsstellungen eines Strahlrohres

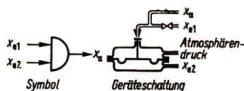


Bild 8.88. Pneumatisches Verknüpfungselement (UND-Glied)

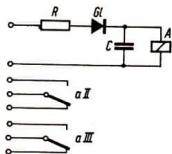


Bild 8.89. Schaltung eines Verzögerungsrelais mit R-C-Glied

8.6.4.2. Hydraulische Verstärker

Mit einem Strahlrohr oder mit einem Steuerkolben läßt sich der Druck an einem Arbeitskolben steuern (Bilder 8.86., 8.87.). Hydraulische Verstärker erzeugen große Stellkräfte. Die Anordnung zeigt I-Verhalten (I-Verstärker).

8.6.5. Steuergeräte

Viele Geräte der Steuereinrichtung können auch für Regeleinrichtungen verwendet werden und umgekehrt. Das gilt besonders für Eingabe- und Stellglieder. Wichtige Steuergeräte sind die logischen Verknüpfungselemente, z. B. pneumatische Verknüpfungselemente (Bild 8.88.) oder die mit Halbleitern aufgebauten TRANSLOG-Bausteine. Mit Programmzeitgebern (Bild 8.90.) können vorgegebene Schaltprogramme (z. B. für eine automatische Waschmaschine) selbsttätig gesteuert werden. Zeitrelais sind Relais, deren Einschalt- und bzw. oder Ausschaltzeitpunkt gegen den Steuerbefehl verzögert ist (Bild 8.91.). Diese Verzögerung erfolgt thermisch (Aufheizen eines Bimetalls), elektronisch (mit R-C-Glied) oder durch ein Uhrwerk (Bilder 8.89., 8.92. und 8.93.).

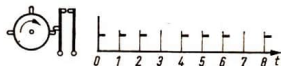


Bild 8.90. Programmzeitgeber mit Schaltdiagramm (Prinzip)

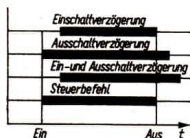


Bild 8.91. Diagramm für Zeitrelais

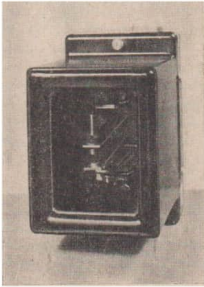


Bild 8.92. Thermisches Zeitrelais RZ12 des VEB Statex Ilmenau

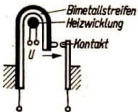


Bild 8.93. Funktionsprinzip zum thermischen Zeitrelais

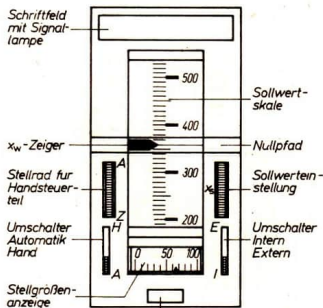


Bild 8.94.a Unstetiger Regler Typ RLU (Frontplatte)

8.6.6. Regler

Eine wichtige Operation im Regelkreis stellt der Soll-Istwert-Vergleich dar (Bild 8.95.). Dazu wird die Regelabweichung x_w aus der Differenz zwischen Istwert x und Sollwert x_s gebildet. Als Regler bezeichnet man das Gerät, das die wesentliche Verarbeitung der Regelabweichung vornimmt. Das können einfache Geräte mit Mehrpunktverhalten, wie Quecksilber-Kontakt-thermometer (Bild 8.74.), Instrumente mit Grenzkontakten (Bild 8.24.), Temperaturregler wie beim Kühlschranks, aber auch Verstärker mit Rückführungen und Zeitverhalten, wie bei den Rückführschaltungen angegeben, sein. Bild 8.94. zeigt einen elektronischen Regler der ursacord-Null-trend-Reihe. Da sich im normalen Betriebsfall der x_w -Zeiger auf dem Nullpfad befindet und eine Abweichung davon sofort ins Auge fällt (Bild 8.94.a), ergibt sich in der Reihe bei nebeneinander angeordneten Reglern bzw. Leitgeräten dieser Reihe eine gute Übersicht (Bild 8.94.b).

Die Hauptbedienelemente befinden sich an der Frontseite. Es ist wahlweise Hand- oder Automatikbetrieb möglich. Der Sollwert kann intern gebildet oder extern (Sollwertsteuerung) zugeführt werden. Der Regler ist funktionell ein Dreipunktglied mit Rückführung. Der Ansprechwert und die Hysterese des Dreipunktgliedes sowie die Nachstellzeit T_n und die Reglerverstärkung K_p lassen sich intern einstellen.

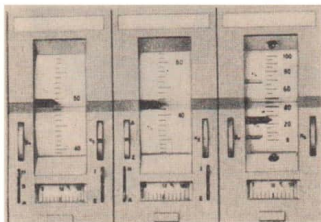


Bild 8.94.b Geräte der 'ursacord-Null-trend-Reihe' aus dem VEB Messgerätekombinat „Erich Weinert“, Magdeburg

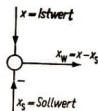


Bild 8.95.
Soll-Istwert-Vergleich

8.6.7. Rechengeräte

Rechengeräte unterwerfen die Signale verschiedenen mathematischen Operationen. So können mit ihnen z. B. Signale multipliziert, dividiert, integriert, addiert oder subtrahiert werden.

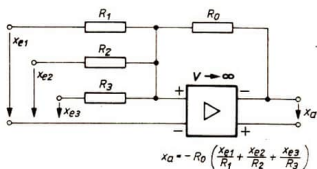


Bild 8.96. Summierschaltung

Bild 8.96. zeigt als einfaches Beispiel eine Summierschaltung, die mit einem Operationsverstärker aufgebaut wurde. Idealiert gilt wieder, daß eine verschwindend kleine Eingangsspannung den Verstärker auszusteuern vermag. Mit R_1 , R_2 und R_3 werden aus den Eingangsspannungen Ströme, die durch den Rückkopplungsstrom $\frac{x_a}{R_0}$ kompensiert werden. Das heißt

$\frac{x_{e1}}{R_1} + \frac{x_{e2}}{R_2} + \frac{x_{e3}}{R_3} = -\frac{x_a}{R_0}$, woraus die im Bild 8.96. angegebene Gleichung für die gewichtete Summe von drei Eingangsgrößen folgt.

8.6.8. Steleinrichtungen

Mit den Steleinrichtungen werden die Befehle der informationsverarbeitenden Glieder ausgeführt. Dazu muß in einen Massen- oder Energiestrom eingegriffen werden. Verstellt werden Drosselklappen (Bild 8.97.), Ventile, Schalter usw. von Stellkolben, Membranantrieben, Elektromotoren mit Getriebe und Elektromagneten (Bilder 8.98. bis 8.100.).

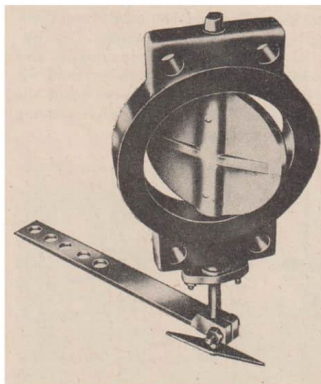


Bild 8.97. Drosselklappe, VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow

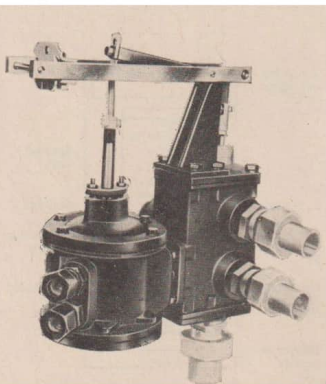


Bild 8.98. Hydraulischer Folgesteuerkolben, VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow



Bild 8.99. Ventil mit Membranantrieb, VEB Mertik, Quedlinburg



Bild 8.100. Magnetventil, VEB Mertik, Quedlinburg

8.7. Steuerungstechnik

8.7.1. Allgemeine Begriffe der Steuerungstechnik

Charakteristisch für eine Steuerung ist der – im Gegensatz zur Regelung – *nicht geschlossene Wirkungsweg* (Bild 8.101.).

Bei einer *Handsteuerung* übernimmt der Mensch ständig die Aufgabe eines Gliedes im Wirkungsweg. Mit dem Begriff *Steuerung* sind meist *selbsttätige Steuerungen* – bei denen alle Vorgänge durch Geräte ausgeführt werden – gemeint. Eine *Führungssteuerung* liegt vor, wenn das Stellglied nach einer vorgegebenen Gesetzmäßigkeit in Abhängigkeit von einer *gemessenen Führungsgröße* betätigt wird (Beispiel siehe 8.7.3.). Eine andere Art der Steuerung ist die *Programmsteuerung*. Diese kann eine *Zeitplansteuerung* (Beispiel siehe 8.7.2.) oder eine *Ablaufsteuerung* (Beispiel siehe 8.7.4.) sein. Beiden gemeinsam ist ein festliegendes (gespeichertes) Programm. Der *Zeitplangeber*, z. B. eine Schaltuhr, muß durch ein *Auslösesignal* gestartet werden. Bei der *Ablaufsteuerung* hängt der Verlauf der gesteuerten Größe von anderen Größen der Steuerung entsprechend dem gespeicherten Programm ab.

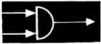
Die Steuerung über größere Entfernungen (Umspannung, unbemannte Stationen, Satelliten usw.) ist ein besonderes Gebiet der Steuerungstechnik. Solche Steuerungen sind meist mit Überwachungseinrichtungen, wie Fernmeßeinrichtungen und Grenzwertmeldern, gekoppelt.



Bild 8.101. Allgemeiner Blockschauplan einer Steuerung

8.7.2. Zeitplansteuerung

Die Straßenbeleuchtung kann mit einer Schaltuhr zu bestimmten Zeiten ein- und ausgeschaltet werden (Bild 8.102.). Dem jahreszeitlichen Gang der Tag- und Nachtlänge konnte man durch besondere Schaltuhren begegnen, deren Schaltprogramm sich im Laufe des Jahres verändert.



Andere Einflußgrößen, wie z. B. die Bewölkungsdichte, können mit einer Zeitplansteuerung grundsätzlich nicht erfaßt werden. Dieser Nachteil der Zeitplansteuerung fällt bei anderen Anwendungen, wie der Steuerung von Waschmaschinen, elektrolytischen Bädern, Reklamebeleuchtung, des Einkochens von Konserven u. ä., nicht so sehr ins Gewicht.

Der Anteil der Steuerungstechnik ist bei der Eisenbahn besonders groß. Ein Beispiel, wie die Steuerungstechnik zur Erhöhung der Sicherheit und Befreiung des Menschen von monotoner Tätigkeit beitragen kann, sind die automatischen Halbschranken. Untersuchungen ergaben, daß Schrankenwärter durchschnittlich nach 1000 Handlungen eine Fehlhandlung begehen. Die automatische Anlage läßt dagegen erst nach 10 Millionen Schaltungen einen Fehler erwarten!

Ihre Wirkungsweise ist folgende: Etwa 1 km vor der Schranke schaltet der herannahende Zug Verbiegen der Schienen einen Kontakt. Daraufhin leuchtet an der Schranke ein rotes Warnlicht auf, und nach etwa 8 s (Zeitrelais!) werden die Halbschranken geschlossen. Die Öffnung der Schranken erfolgt auf ähnliche Weise.

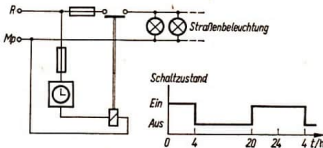


Bild 8.102. Zeitplansteuerung einer Straßenbeleuchtung und zugehöriger Zeitplan

8.7.3. Führungssteuerung

Die Zeitplansteuerung der Straßenbeleuchtung hat den Nachteil, daß große Energiemengen durch zu frühes Einschalten und zu spätes Ausschalten verlorengehen, während im umgekehrten Fall die Unfallgefahr steigt. Diese Nachteile lassen sich vermeiden, wenn die Tageshelligkeit den Schaltzustand der Straßenbeleuchtung steuert. Man erhält dann eine Führungssteuerung. Bild 8.103. zeigt das Prinzip eines Dämmerungsschalters. Führungsgröße ist die Helligkeit.

Die Helligkeit wird mit einer Fotozelle erfaßt. Bei Eintritt der Dämmerung schaltet das nachfolgende Zweipunktglied (hier ein sogenannter Schmitt-Trigger) über Relais und Schütz die Lampen ein. Durch Verstellen eines Widerstandes läßt sich der Schaltungspunkt einstellen. (Die Lampen der Straßenbeleuchtung dürfen nicht auf die Fotozelle scheinen, weil sonst dauernd ein- und ausgeschaltet würde; ein gutes Beispiel dafür, daß durch eine Rückführung Schwingungen entstehen können.)

Eine analoge Helligkeitssteuerung kann für die Beleuchtung von Tunneln, die von Kraftfahrzeugen befahren werden, Verwendung finden. Paßt man nämlich mit der in Bild 8.104. angegebenen Steuerkette die Beleuchtungsverhältnisse im Tunnel der Tageshelligkeit an, so besteht bei Ein- und Ausfahrt eine geringere Blendung, und die Unfallgefahr sinkt.

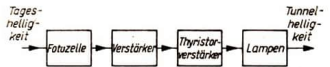


Bild 8.103. Dämmerungsschalter, Blockschaftplan

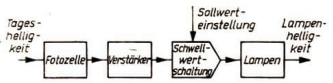


Bild 8.104. Führungssteuerung einer Tunnelbeleuchtung

8.7.4. Ablaufsteuerung

Zur Erläuterung einer automatischen Ablaufsteuerung sei das programmgemäße Füllen zweier Behälter herangezogen. Es möge folgende Aufgabe bestehen: Behälter B_1 soll vorrangig über Ventil V_1 gefüllt werden, Behälter B_2 über Ventil V_2 erst dann, wenn Behälter B_1 gefüllt ist. Nach Füllung beider Behälter soll das Hauptzuflußventil V_3 geschlossen werden. Die Fühler F_1 und F_2 geben bei vollen Behältern ein Signal (L) ab. Die Ventile öffnen, wenn das Signal (L) erscheint. Bild 8.105. zeigt schematisch, wie diese Aufgabe mit logischen Verknüpfungselementen gelöst werden kann.



Man kann ablesen: V_3 wird geöffnet, wenn B_1 nicht oder wenn B_2 nicht gefüllt ist. V_1 wird geöffnet, wenn B_1 nicht gefüllt ist. V_2 wird geöffnet, wenn B_1 gefüllt und B_2 nicht gefüllt ist.

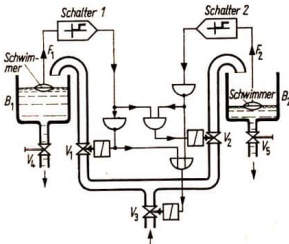


Bild 8.105. Programmgemäßes Füllen durch Ablaufsteuerung

8.7.5. Gesteuerte Werkzeugmaschinen

Die Teilefertigung mittels Werkzeugmaschinen stellt einen Prozeß mit häufiger Wiederholung von gleichbleibenden Bearbeitungsvorgängen dar. Dies legt eine Rationalisierung durch Steuerung nahe. Mechanische Steuerungen, bei denen als „Programmspeicher“ Kurvenscheiben verwendet werden, sind schon sehr lange im Gebrauch. Diese analogen Speicher sind teuer in der Herstellung, in der Genauigkeit begrenzt und unterliegen der Abnutzung. Nun bietet die fortgeschrittene Datenverarbeitungstechnik **digitale Speicher** an, die weitaus flexibler sind, eine praktisch unbegrenzte Genauigkeit haben und es gestatten, sehr viel größere Programme aufzunehmen. Die mit Lochstreifen und zunehmend auch mit Magnetbändern und Kernspeichern arbeitenden digitalen Steuerungen werden in der Fertigungstechnik **numerische Steuerungen** oder NC-Steuerungen (nach dem englischen *numeric control*) genannt, siehe Bild 8.106. Realisiert werden Punkt-, Strecken- und Bahnsteuerungen. Der steigende Program-

mieraufwand kann zum Teil durch automatische Anfertigung der Programme mittels Rechnern oder mit Lernprogrammen abgefangen werden. Durch das Lernprogramm werden die bei manueller Steuerung der Werkzeugmaschinen benutzten Steuerbefehle zu einem reproduzierbaren Programm zusammengestellt. Die Entwicklung der Digitalrechner mit den gestiegenen, vielfältigen Möglichkeiten führte dazu, mit ihnen auch die Steuerung von einer oder mehreren, verketteten Werkzeugmaschinen vorzunehmen.

Die prinzipiellen Nachteile einer Steuerung, auf wechselnde Umgebungsbedingungen (Temperatur, Werkzeugabnutzung) nicht zweckentsprechend zu reagieren, können durch die Steuerung in Abhängigkeit von Messungen der aufgabengemäß zu erreichenden Parameter vermieden werden. Diese „Meßsteuerungen“ und „Meßregelungen“ ergänzen die numerischen Steuerungen sehr wirkungsvoll [18].

8.7.6. Lehrmaschinen

Lehrmaschinen können durch einfache Steuerungen verwirklicht werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten für die innere Organisation von Lehrmaschinen. Vielen gemeinsam ist ein in Darbietung des Stoffes, Fragen und Antworten aufgeteiltes inneres *Lehrbuch*. Der Lernende erhält meist den Lehrstoff auf einer großen Sichtscheibe dargeboten. Nachdem er sich mit ihm vertraut gemacht hat, kann er ihn verschwinden lassen. Daraufhin stellt die Maschine Fragen, und der Lernende muß aus mehreren auf der Sichtscheibe dargebotenen numerierten Antworten die richtigen auswählen. Die gewählten Antworten gibt er der Maschine (durch Betätigen von Schaltern o. ä.) bekannt. Die Maschine — die ja die richtigen Antworten weiß — schreitet, wenn alle Antworten richtig waren, im Lehrstoff weiter fort. Falsche Antworten korrigiert sie, indem sie den betreffenden Teil des abgefragten Stoffes ausführlicher wiederholt. Daraufhin werden zu diesem Teil neue Fragen gestellt. Werden alle Fragen richtig beantwortet, wird so fortgefahren, wie bei richtiger Beantwortung der vorigen Fragen; andernfalls kann z. B. auf Grundlagen verwiesen werden. Der Unterricht erfolgt also nach einem vorher genau festgelegten Programm. Die größten Schwierigkeiten beim Bau einer Lehrmaschine bietet die Aufstellung des Lehrprogramms. Es ist gänzlich anders gegliedert als ein normales Lehrbuch und soll ja auch auf jede falsche Antwort hin eine ausführliche Erklärung bereit haben. Demgegenüber treten die technischen Probleme in den Hintergrund. Sie beschrän-

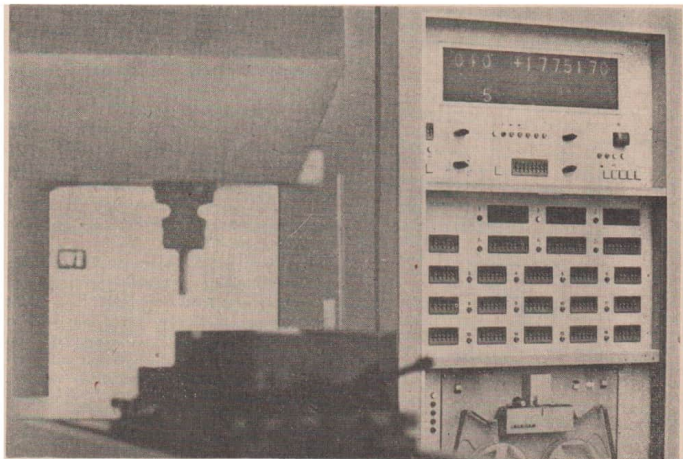


Bild 8.106. Numerische Steuerung NC 470 in Verbindung mit einer Werkzeugmaschine

ken sich auf relativ einfache logische Schaltungen und eine automatische Vorführung bzw. Wiedergabe bestimmter, von der Maschine auszuwählender Diapositive, Textabschnitte von Magnetbändern oder ähnliches [19], [20].

8.8. Regelungstechnik

8.8.1. Einige Grundlagen der Regelungstechnik

Aufgabe einer Regelung ist es, die *Regelgröße* x durch Verändern der *Stellgröße* y an die *Führungsgröße* w anzugleichen. Voraussetzung dabei ist, daß die Regelgröße x – auch bei den immer vorhandenen Einwirkungen von *Störgrößen* z – durch die Stellgröße y in gewünschter Weise beeinflußt werden kann. Das Glied mit den Eingangsgrößen z und y und der Ausgangsgröße x ist die *Regelstrecke*. Die *Regleinrichtung* bildet die *Regelabweichung* $x_w = x - w$ durch Subtraktion ($x_w = x - w$) und leitet daraus die Stellgröße y ab (Bild 8.107.). Die Übergangs-

funktion der Regeleinrichtung (die z. B. ein PID-Glied sein kann) muß an die Regelstrecke angepaßt werden. Regelstrecke und Regeleinrichtung bilden den *Regelkreis*. Innerhalb dieses Kreises muß eine *Vorzeichenumkehr* erfolgen, d. h., wenn eine Störgröße z. B. eine *Erhöhung* der Regelgröße zur Folge hatte, muß die Regeleinrichtung durch Verändern der Stellgröße eine *Verminderung* der Regelgröße veranlassen. Der Regelkreis kann selbst wieder als ein Glied aufgefaßt werden, das die Ausgangsgröße x und die Eingangsgrößen w und z hat. Dieses Glied *Regelkreis* kann man wieder mit Testsignalen untersuchen. Bild 8.108. stellt das *Störungsübergangsverhalten* eines Regelkreises (Beispiel) dar. Dieses ergibt sich als Verlauf der Regelgröße bei konstant gehaltener Führungsgröße und sprunghafter Änderung der Störgröße. Bei der Betrachtung des Bildes fällt besonders die *bleibende Regelabweichung* X_B bei Verwendung des P-Reglers auf. Die bleibende

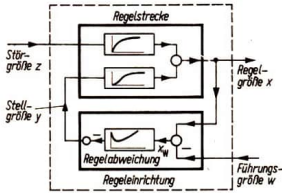
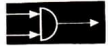


Bild 8.107. Darstellung eines einfachen Regelkreises

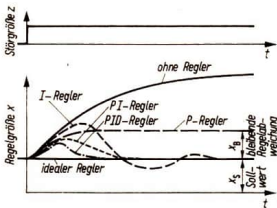


Bild 8.108. Verhalten einer Regelung bei Auftreten einer Störgröße

Regelabweichung ist leicht zu erklären, wenn man bedenkt, daß zur Beseitigung der Störgrößeneinwirkung eine bestimmte Stellgröße erforderlich ist. Der P-Regler kann diese Stellgröße wegen der Proportionalität zwischen Ein- und Ausgangsgröße aber nur bei vorhandener Regelabweichung abgeben. Mit größerem K_P des Reglers läßt sich x_B zwar verkleinern, ein zu großes K_P kann jedoch zur Instabilität (Dauerschwingungen) der Regelung führen. Ein I-Anteil des Reglers verhindert die bleibende Regelabweichung, da der Ausgang eines I-Gliedes eben vom Integral und nicht vom jeweiligen Wert der Eingangsgröße abhängt. Ein I-Regler darf jedoch nicht an einer Strecke mit I-Verhalten eingesetzt werden, da das entstehende System instabil ist.

Die Regelung läßt sich häufig weiter durch Hilfsgrößenaufschaltungen verbessern. Im Bild 8.109.a bis c sind einige Prinzipien dafür angegeben. Die Hilfsgrößen dürfen natürlich

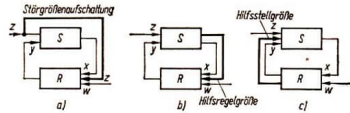


Bild 8.109. Aufschalten von Hilfsgrößen zur Verbesserung der Regelung

zu keiner bleibenden Veränderung von x führen, deswegen liegen in ihrem Wirkungsweg meist noch D-Glieder, deren Ausgangssignal bei konstantem Eingangssignal gegen Null geht. Hilfsregelgrößen können Zwischengrößen sein, die schneller als die eigentliche Regelgröße auf Störungen reagieren. Ähnlich soll eine Hilfsstellgröße schneller auf x einwirken als die Stellgröße [8]. Ähnlich wie das Störungsübergangsverhalten stellt man das Führungsverhalten des Regelkreises fest. Hierzu werden die Störgrößen konstant gehalten, und es wird untersucht, wie die Regelgröße den Änderungen der Führungsgröße folgt.

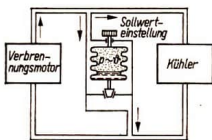
8.8.2. Regelungen ohne Hilfsenergie

Für einfache Regelungen kann man das Meßglied oftmals so ausführen, daß seine Ausgangsgröße ohne zusätzliche Energiezufuhr eine Verstellung herbeiführen kann [26]. So kann z. B. die Temperaturregelung für das Kühlwasser eines Verbrennungsmotors mit einem Metallfaltenbalg erfolgen, der mit einer leicht verdampfenden Flüssigkeit gefüllt ist (Bild 8.110.).

Da sich der Dampfdruck mit steigender Temperatur erhöht, wird durch die Ausdehnung des Metallfaltenbalges die Ventilöffnung verkleinert. Daraufhin fließt mehr Kühlwasser durch den Kühler, was einer weiteren Erwärmung entgegenwirkt.

8.8.3. Elektronische Spannungs- und Stromstabilisierung

Für Speisespannungen empfindlicher Geräte, für die Erzeugung von Sollwerten und für andere Zwecke werden häufig konstante Spannungen oder konstante Ströme benötigt. Mit Z-Dioden gelingt die Stabilisie-



rung (nicht Regelung) von Spannungen eines bestimmten Wertes durch die Ausnutzung ihrer nichtlinearen Kennlinie (Bild 8.112.). Für weitergehende Ansprüche kann die Regelschaltung nach Bild 8.111. verwendet werden. Als Sollwertgeber wird wieder eine Z-Diode benutzt, die hier allerdings mit einer geregelten Spannung gespeist wird und deren Strom sich nur geringfügig ändert.

8.8.4. Durchflußregelung

The diagram shows a circuit for voltage stabilization. A resistor R is connected in series with a Zener diode Z . The input voltage is labeled "Speise-Spannung" (Supply Voltage) and the output voltage is labeled "stabilisierte Spannung" (Stabilized Voltage). To the left, a graph shows the current i versus the voltage U across the Zener diode. The curve shows that for a wide range of input voltages, the current remains near zero until it reaches the Zener voltage, after which it increases sharply, maintaining a constant voltage across the diode.

zu regeler Durchfluß

Meßblende

+

-

Pneumatischer Regler

Membran-Meßwerk

Membran-ventil

$P_k = y$

P_N Hilfsluft Vordruck

324



den kann. In beiden Fällen wird mit Meßblende und Membranmeßwerk gemessen und den Abweichungen vom Sollwert mit Querschnittsänderungen begegnet. Bei der hydraulischen Regelung (I-Regler) kann Regelschwingungen durch eine Rückführung entgegengewirkt werden.

8.8.5. Drehzahlregelung

Für Walzwerke und ähnliches werden oft genaue Drehzahlen bei großen abgegebenen Leistungen verlangt. Die direkt an das Netz anzuschließenden Drehstrommotoren lassen sich bei wenig verminderter Leistungsabgabe nur schlecht in der Drehzahl beeinflussen. Deswegen treibt der Drehstrommotor erst einen Gleichstromgenerator, dessen abgegebene Spannung sich durch die Erregung gut steuern läßt. Mit dieser weitgehend veränderbaren Spannung wird dann der eigentliche Gleichstrom-Antriebsmotor gespeist. Diese Anordnung – nach ihrem Erfinder *Leonard-Satz* genannt – hat in der Antriebstechnik eine große Bedeutung erlangt. Im Bild 8.116. ist eine Drehzahlregelung mit einem Leonard-Satz dargestellt.

Die Drehzahl wird mit einem Tachogenerator gemessen. Die durch Subtraktion der Sollwertspannung von der Generatorspannung gewonnene Regelabweichung steuert einen Verstärker und dieser die Feldwicklung des Gleichstromgenerators. Das *R-C*-Netzwerk vor dem Verstärker verleiht der Regelung PD-Verhalten.

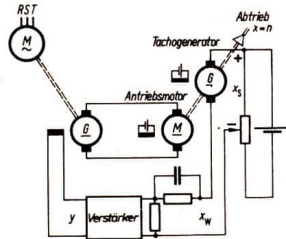


Bild 8.116. Drehzahlregelung mit Leonard-Satz (Prinzip)

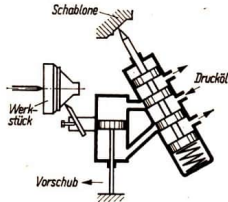


Bild 8.117. Folgeregelung an einer Kopierdrehbank

8.8.6. Folgeregelung

Im Gegensatz zu den bisherigen Beispielen (den Festwertregelungen) wird bei den Folgeregelungen die Führungsgröße fortlaufend geändert. Es wird Wert darauf gelegt, daß die Regelgröße der Führungsgröße möglichst genau folgt. P-Regler sind hierfür wegen der bleibenden Regelabweichung selten geeignet. Bild 8.117. zeigt einen Folge-regler, der häufig an Kopierdrehbänken verwendet wird. Wegen der großen Verstellkräfte und kleinen Stellzeiten wird hier eine hydraulische Anordnung bevorzugt.

In der hydraulischen Folgeregelung nach Bild 8.118. wird die Führungsgröße für den

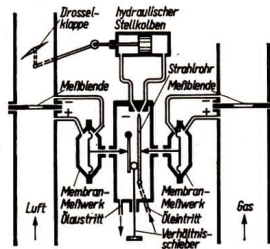


Bild 8.118. Gemischregelung als Folgeregelung



Luftdurchfluß durch den Gasdurchfluß vorgegeben. Solche Gemischregelungen werden häufig an Industrieöfen eingesetzt, bei denen für eine gute Verbrennung Gas- und Luftmenge in einem bestimmten Verhältnis stehen müssen.

Die von dem Membranmeßwerk für Luft herrührende Kraft wirkt hier nicht direkt, sondern über ein Hebelsystem — den sogenannten Verhältnisschieber — auf das Strahlrohr ein. Da das andere Meßwerk direkt auf das Strahlrohr wirkt, lassen sich durch Veränderung des Hebelverhältnisses verschiedene Mischungsverhältnisse zwischen Luft- und Gasdurchfluß einstellen.

8.8.7. Zeitplanregelung

Die Zeitplanregelung hat große Ähnlichkeit mit der Zeitplansteuerung. Der Sollwert wird hier von einer Kurvenscheibe gespeichert. Die Kurvenscheibe kann über ein Getriebe von einem Synchronmotor angetrieben werden. Der durch die Kurvenscheibe jeweils vorgegebene Wert wird für die Verstellung eines Drehwiderstandes benutzt.

8.8.8. Regelung einer Destillationskolonne

Mit einer Destillationskolonne (Bild 8.119.) werden die einzelnen Komponenten des Einsatzes durch eine genau eingehaltene

Temperaturverteilung längs der Kolonne nach ihren unterschiedlichen Siedepunkten getrennt. Für die Regelung der Kolonne hat sich die im Bild gezeigte Anordnung der einzelnen Regelungen als zweckmäßig erwiesen. Die einzelnen Regelungen beeinflussen sich mehr oder minder gegenseitig. So wird sich z. B. im allgemeinen mit der Erhöhung der Sumpftemperatur auch die Kopf-temperatur erhöhen. Diese gegenseitige Beeinflussung ist das charakteristische Kennzeichen für *Mehrfachregelungen*.

Auf einzelne verfahrenstechnische Fragen wird nicht eingegangen. Das Beispiel soll lediglich einen kleinen Einblick über den Umfang und die Schwierigkeit der in der Praxis vorkommenden Regelungen geben.

8.8.9. Einsatz von Rechnern

Schon einfache Geräte, wie die Stromwaage oder P-, I- oder D-Glieder, können als Rechner aufgefaßt werden, weil ihre Ausgangssignale aus der Multiplikation, Integration oder Differentiation der Eingangssignale hervorgehen. Diese Gedanken hat man konsequent weiterverfolgt und unter Verwendung von Verstärkern, R-C-Gliedern, nicht-linearen Bauelementen u. a. m. sogenannte *Analogrechner* aufgebaut. Die in den Analogrechnern ablaufenden physikalischen Vor-

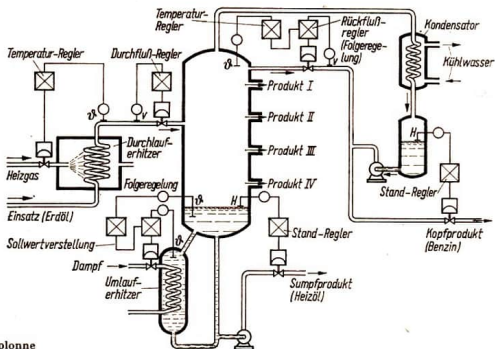


Bild 8.119.
Regelung einer Destillationskolonne

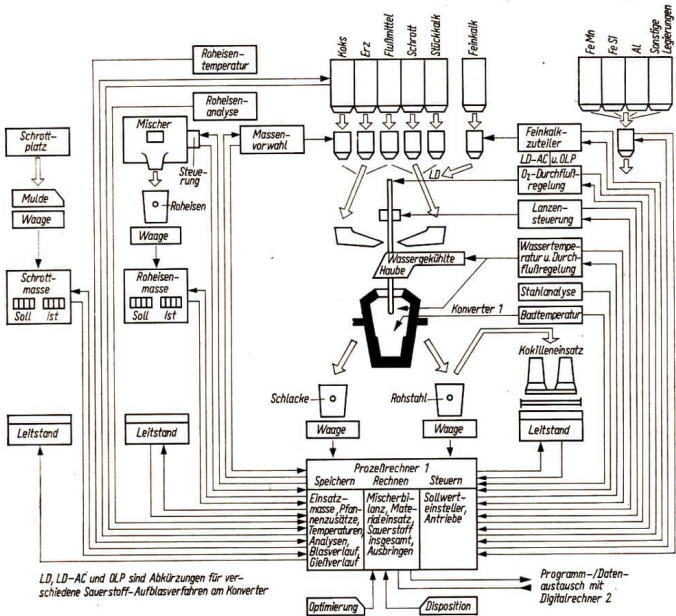


Bild 8.120. Einsatz eines Prozeßrechners in einem Sauerstofftaillwerk

gänge – meist der Zeitverlauf von elektrischen Spannungen – können durch bekannte Differentialgleichungen beschrieben werden. Der sich unter Berücksichtigung von Anfangsbedingungen ergebende Werteverlauf der interessierenden Größen stellt praktisch die Lösung der Differentialgleichungen dar, die man z. B. direkt vom Schirm einer Oszillographenröhre ablesen kann. Es sei darauf verwiesen, daß der Rechenschieber einen, allerdings einfachen Analogrechner darstellt. In der Automatisierungstechnik werden häufig Analogrechner eingesetzt, um die un-

übersichtlichen Vorgänge komplizierter Regelungen und ähnliches nachzubilden, zu simulieren. Ordnet man dabei den in der Praxis vorliegenden Geräten bestimmte Einheiten des Rechners zu, so spricht man von Modellregelkreisen und Simulatoren, siehe auch [1], [8].

Neben den Analogrechenmaschinen haben in den letzten Jahren programmgesteuerte Digitalrechner eine große Bedeutung erlangt. Diese Geräte enthalten im wesentlichen logische Verknüpfungselemente und Speicherzellen. Den bis dahin üblichen Hand- oder elektrischen Tischrechenmaschi-



nen – die handgesteuerte Digitalrechner sind – sind sie an Schnelligkeit und am Umfang der zu berechnenden und zu speichernden Größen weit überlegen.

Mit elektronischen Rechnern konnten bereits viele Aufgaben gelöst werden, an deren Lösung sonst gar nicht gedacht werden konnte. So kann man mit ihnen z. B. in Wärmekraftwerken den thermischen Wirkungsgrad so schnell berechnen, daß die Auswirkung eingeleiteter Maßnahmen gut übersehen werden kann. Gelingt es auf diese Weise, den Wirkungsgrad eines großen Kraftwerkes um etwa 1 % zu verbessern, so amortisiert sich die Rechenanlage bereits nach einem Jahr.

Die Leitungsverluste bei der Fortleitung der elektrischen Energie vom Kraftwerk zum Verbraucher betragen rund 10 % der bereitgestellten Energie. In den modernen Verbundnetzen können diese Verluste verringert werden, indem bei gegebenem Energieverbrauch die Energieabgaben geeignet auf die einzelnen Kraftwerke aufgeteilt werden. Mit sogenannten Netzrechenmaschinen gelingt dieses *Optimieren* in der erforderlichen Schnelligkeit.

Voraussetzung für den Einsatz einfacher Rechner ist eine mathematische Formulierung des zu regelnden Prozesses. Der Vorgang einer Stahlschmelzung läßt sich z. B. nur mit über 100 Formeln bei mehr als 300 Parametern beschreiben. Bild 8.121.

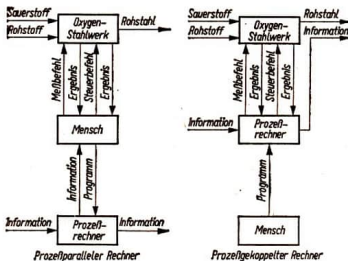


Bild 8.121. Einsatzmöglichkeiten eines Prozeßrechners

zeigt zwei grundsätzliche Möglichkeiten für den Einsatz eines Rechners in einem Oxygenstahlwerk. Während der prozeßparallele Rechner nur die Informationsverarbeitung für den Menschen übernimmt, führt der prozeßgekoppelte Rechner selbst die Befehle, die sich aus der Informationsverarbeitung ergeben, aus. Gerade in einem Stahlwerk lohnt sich der Einsatz von Rechnern, da die Vorgänge sehr stoffintensiv sind. Weiterhin kann man durch eine genaue Steuerung der technologischen Vorgänge eine Schonung des Konverters erreichen. Der Rechner arbeitet dabei als übergeordneter Regler, der die Eingabegrößen von Steuerungen und die Führungsgrößen von Regelungen verstellt. Bild 8.120. gibt einen Überblick über den Einsatz eines Rechners in einem Oxygenstahlwerk. Aus Sicherheitsgründen werden bei zwei oder drei Sauerstoffblaskonvertern wenigstens zwei Rechner eingesetzt.

Auch wenn die mathematische Beschreibung des Prozesses nicht gelingt, ist der Einsatz von Rechnern möglich. Diese *selbst-optimierenden* Rechner nähern sich dabei durch Probieren sukzessiv der optimalen Fahrweise, wobei sowohl die Kennwerte als auch die Struktur des zu optimierenden Prozesses geändert werden können. Dieses Gebiet der Automatisierungstechnik befindet sich zwar noch in den Anfängen der Entwicklung, läßt aber für die Zukunft eine weitgehende Vollautomatisierung erwarten.

8.9. Weiterführende Literatur

- [1] Brockhaus ABC Automatisierung. VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig 1975.
- [2] Klaus/Liebscher: Systeme – Informationen – Strategien. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [3] Reinisch: Kybernetische Grundlagen und Beschreibung kontinuierlicher Systeme. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [4] Zypkin: Grundlagen der Theorie lernender Systeme. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [5] Wunsch: Systemanalyse. Band 1: Lineare Systeme; Band 2: Statistische Systemanalyse; Band 3: Digitale Systeme. VEB Verlag Technik, Berlin.



- [6] Fiedler/Gottwalt/Hacker: Steuerungs- und Regelungstechnik. Lehrbuch für die Berufsbildung. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [7] Semrad/Otto: Wissenspeicher für die Berufsbildung. Grundlagen der BMSR-Technik. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [8] Oppelt: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie, Weinheim (Bergstraße), und VEB Verlag Technik, Berlin.
- [9] Wiedmer: Angewandte Automatisierungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [10] TGL 14 091: Steuerungs- und Regelungstechnik, Kennzeichen und Symbole. TGL 14 591: Steuerungs- und Regelungstechnik, Begriffe und Benennungen.
- [11] Lunze: Berechnung elektrischer Stromkreise. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [12] Götte/Hart/Jeschke: Taschenbuch Betriebsmeßtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [13] Hofman/Gatzmanga: Einführung in die Betriebsmeßtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [14] Nitsche/Trumpold: Einführung in die Längenmeßtechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1974.
- [15] Baumann: Elektrische Kraftmeßtechnik. (Reihe Meßtechnik). VEB Verlag Technik, Berlin.
- [16] Zeitlin: Volumen- und Durchflußmeßtechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1972.
- [17] Ostrovskij: Elektrische Meßtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [18] Bartsch: VEM-Handbuch. Numerische Steuerungen. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [19] Schestakow: Programmiertes Lernen und Lehrmaschinen. VEB Verlag Technik, Berlin 1965.
- [20] Itelson: Mathematische und kybernetische Methoden in der Pädagogik. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin.
- [21] Brack: Technik der Automatisierungsgeräte. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [22] Oppelt/Vossius: Der Mensch als Regler. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [23] Autorenkollektiv: Automatisierungstechnik in Beispielen. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [24] Autorenkollektiv: Taschenbuch Feingerätetechnik. Band 2. VEB Verlag Technik, Berlin.
- Die Titel [25] bis [40] gehören zur Schriftenreihe „Automatisierungstechnik“. VEB Verlag Technik, Berlin. Herausgeber B. Wagner und G. Schwarze.
- [25] Schwarze: Grundbegriffe der Automatisierungstechnik.
- [26] Woschni: Information und Automatisierung.
- [27] Woschni: Signal und Automatisierung.
- [28] Draeger: Automatisierung und Berufsbildung in der DDR.
- [29] Bär: Einführung in die Schaltalgebra.
- [30] Peschel: Kybernetik und Automatisierung.
- [31] Peschel: Kybernetische Systeme.
- [32] Jeschke: Kleines Lexikon der Prozeßmeßtechnik.
- [33] Gottschalk: Elektronische Bausteinsysteme der Digitaltechnik.
- [34] Töpfer: Pneumatische Bausteinsysteme der Digitaltechnik.
- [35] Bittner: Pneumatische Funktionselemente.
- [36] Hesse/Zapf: Kleines Lexikon der fertigungstechnischen Automatisierung.
- [37] Töpfer/Kriesel: Kleinautomatisierung durch Geräte ohne Hilfsenergie.
- [38] Piegert u. a.: Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen.
- [39] Hartleib/Petermann: Prozeßrechner zur Steuerung von Fertigungsprozessen im Maschinenbau.
- [40] Paulin: Kleines Lexikon der Rechentechnik und Datenverarbeitung.



9. Grundbegriffe der mechanischen Technologie

verfaßt von Dr. oec. Ing. H. Schenkel
unter Mitarbeit Dipl.-Gwl. W. Schnurpel

9.1. Fertigungstechnik – Fertigungsverfahren

9.1.1. Allgemeine Charakteristik der Fertigungstechnik

Technologische Prozesse sind wesentliche Bestandteile aller Produktionsprozesse und dadurch charakterisiert, daß in ihnen die Arbeitskräfte mit Hilfe von Arbeitsmitteln Veränderungen am Arbeitsgegenstand, ausgehend vom Rohmaterial bis zum Fertigerzeugnis, bewirken. Die Art und Weise der Herstellung eines bestimmten Produktes (Erzeugnisses) wird durch die geforderten Gebrauchseigenschaften und die Funktionen, die ihm als Mittel der produktiven oder individuellen Konsumtion zugeordnet sind, wesentlich beeinflußt. Zwischen dem Fertigerzeugnis (als Arbeits- oder Konsumtionsmittel) und seinem technologischen Herstellungsprozeß (einschließlich der technologischen Verfahren) bestehen dialektische Wechselbeziehungen. Das Erzeugnis erfordert eine bestimmte Technologie der Herstellung, andererseits stellen die technologischen Herstellungsverfahren und -prozesse Anforderungen an die konkrete Gestaltung der Erzeugnisse.

Im industriellen Produktionsprozeß verbindet sich die technologische Zustandsveränderung der Arbeitsgegenstände im Hauptproduktionsprozeß mit den Hilfsprozessen des innerbetrieblichen Transports, der Lagerung und des Werkzeugbaus und bedarf insgesamt einer konkreten Form der Organisation des Produktionsaufbaus und -ablaufes.

Die Veränderung des Arbeitsgegenstandes

bis zum Fertigerzeugnis in technologischen Prozessen der metallverarbeitenden Industrie erfolgt überwiegend schritt- oder stufenweise, mittels einer mehr oder weniger großen Anzahl von technologischen Grundverfahren, die einer Arbeitsgang-Folge entsprechen. Die Gebrauchseigenschaften der Erzeugnisse wie auch ihr Herstellungsprozeß sind gleichermaßen durch technische und ökonomische Forderungen bestimmt. Die *allgemeine* (oder *vergleichende*) Technologie betrachtet die technologischen Grundverfahren an sich, analysiert sie hinsichtlich ihrer naturwissenschaftlichen Grundlagen, der Kriterien ihrer Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen, ihrer Austauschbarkeit unter Berücksichtigung der Zustandsveränderungen am Arbeitsgegenstand und beschreibt die zur Realisierung der technologischen Grundverfahren eingesetzten Arbeitsmittel (Apparate, Geräte, Maschinen, Werkzeuge) in ihren technologischen Parametern (vgl. *Retzke* [3]).

Einer allgemeinen Technologie im oben genannten Sinne entsprechen die beiden Disziplinen *Verfahrenstechnik* und *Fertigungstechnik*. Die bei der Herstellung von Erzeugnissen *ohne feste* Formen zur Anwendung kommenden chemischen und physikalischen Grundverfahren werden von der *Verfahrenstechnik* erfaßt und geordnet. Diese technologischen Grundverfahren findet man nicht nur in industriellen Prozessen der chemischen Industrie, sondern auch in der metallurgischen und Lebensmittelindustrie.

Verfahrenstechnik, chemische Verfahrenstechnik:

Wissenszweig der Technik, in dem man sich mit der chemischen und technologischen Theorie und Praxis der Verfahren sowie der Anlagen, Geräte, Apparate und



Einrichtungen zur wirtschaftlichen Herstellung von Chemierzeugnissen beschäftigt.

Die theoretischen Grundlagen der Verfahrenstechnik werden von der Chemie und Physik, dem Ingenieurwesen und Apparatebau sowie der Meß-, Steuerungs- und Regeltechnik gegeben.

Gegenstand der Verfahrenstechnik sind Probleme des Stoff- und Energietransports, der Grundverfahren (z. B. Mischen, Verdampfen, Kristallisieren, Schmelzen) und der technischen Reaktionsführung, nach: Meyers Neues Lexikon, Bd. 8, S. 447.

Die *Fertigungstechnik* erfaßt die technologischen Grundverfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern (Fertigungsverfahren).

Die fortschreitende gesellschaftliche Arbeitsteilung und der wissenschaftlich-technische Fortschritt führen zu einer weiteren produktionstechnischen Spezialisierung der industriellen Produktion, ihrer Bereiche und Zweige auf typische Erzeugnisse oder Erzeugnisgruppen. Zunehmende Ansprüche an die Gebrauchseigenschaften (Funktion, Qualität, Lebensdauer, Zuverlässigkeit u. a.) sowie zum Teil wachsende Forderungen an die Genauigkeit der Baugruppen und Einzelteile und Erhöhung ihrer Kompliziertheit bedingen die Auswahl von technologischen Verfahren und Herstellungsprozessen nach ökonomischen Kriterien. Es entspricht in der sozialistischen Produktion dem Gesetz der Ökonomie der Zeit und der objektiven Notwendigkeit einer ständig steigenden Arbeitsproduktivität, wenn die Auswahl und Anwendung der technologischen Prozesse und Verfahren unter dem generellen Gesichtspunkt des geringsten Aufwandes an gesellschaftlicher (sowohl vergegenständlicher als auch lebendiger) Arbeit je Erzeugniseinheit bei Sicherung der geforderten Qualitätseigenschaften erfolgt.

Die Zustandsveränderung von Rohteilen zu Fertigteilen sowie das Fügen dieser Teile zu Baugruppen und dieser zu Fertigerzeugnissen in Produktions- und Fertigungsprozessen zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern (Maschinen, Fahrzeugen, elektrotechnisch-elektronischen Bauelementen, Geräten und Anlagen,

Werkzeugen, technischen Konsumgütern usw.) erfolgt heute mittels Fertigungsverfahren, die naturwissenschaftlich nicht nur durch mechanische, sondern auch durch andere physikalische sowie durch chemische oder die Kombination beider Wirkprinzipien determiniert sind. Die Entwicklung und Anwendung der Fertigungsverfahren in der Technologie des Maschinenbaus und der elektrotechnisch-elektronischen Industrie zeigt, daß Verfahren mit physikalisch-chemischem oder chemischem Wirkprinzip wesentlich zur Intensivierung des technologischen Prozesses beitragen.

Fertigungsverfahren mit neuen Wirkprinzipien erweitern deshalb nicht nur das technologische Anwendungsfeld der konventionellen Verfahren mechanischen Prinzips, sie entsprechen auch besonders der Forderung nach Herausbildung und Gewährleistung definierter Stoffeigenschaften mit hoher Qualität und Zuverlässigkeit. Die Funktion bestimmter Bauelemente oder Baugruppen (z. B. Transistoren, integrierte Schaltkreise) ist vorrangig durch die technologische Sicherung definierter physikalischer Eigenschaften gekennzeichnet. Die Formgebung ist hier sekundär gegenüber der Herausbildung der spezifischen technischen Eigenschaften.

Sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Fertigungstechnik finden wir technologische Grundverfahren, die auf chemischen bzw. physikalischen Grundlagen basieren. Zum Beispiel ist die zunehmende Anwendung chemischer Verfahren in der Fertigungstechnik eine charakteristische Tendenz, die sich aus der Chemisierung als einer Hauptentwicklungsrichtung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts ergibt.

Eine Ordnung und Gliederung der technologischen Verfahren allein unter dem Gesichtspunkt der chemischen oder mechanischen Technologie entspricht nicht mehr der herstellungstechnischen Entwicklung und Arbeitsteilung in der industriellen Produktion, da sie den spezifischen technologischen Prozessen der Zustandsände-



rung der Arbeitsgegenstände und den Kriterien technologischer Gestaltungsaufgaben in den prinzipiell unterschiedlichen Produktionsbereichen der Industrie nicht genügt¹.

9.1.2. Wirtschaftlichkeit und Entwicklung von Fertigungsverfahren

Die Fertigungsverfahren (technologischen Grundverfahren) sind das Grundelement technologischer Prozesse in der industriellen Produktion mit fertigungstechnischem Charakter (Maschinenbau, Fahrzeugbau, Elektrotechnik/Elektronik, Produktion technischer Konsumgüter, Instandhaltung und Reparatur von Arbeitsmitteln verschiedener Bereiche der Volkswirtschaft, Gießerei- und Schmiedeproduktion, Produktion von Pumpen und Armaturen, elektrischen Bauelementen und Baugruppen). Ein modernes Fertigungsverfahren stellt eine Einheit von Verfahrens-(Wirk-)Prinzip, Maschine oder Anlage, Werkzeug und Vorrichtung dar. Die Zahl der notwendigen Arbeitsgänge und ihre Aufeinanderfolge im technologischen Prozeß ergibt sich aus der Kompliziertheit der Einzelteile und Baugruppen, aus denen ein Erzeugnis zusammengesetzt wird. Für alle Einzelteile und für die Montage jeder Baugruppe und des Fertigerzeugnisses muß die konkrete *Fertigungsaufgabe* festgelegt werden.

Die Auswahl der Fertigungsverfahren und ihrer Reihenfolge zur Herstellung eines bestimmten Einzelteils erfolgt beispielsweise auf der Grundlage technischer und ökonomisch-organisatorischer Angaben zum Werk-

stück. Das betrifft die Form (Geometrie), die Abmessungen, die Genauigkeit (zulässige Bearbeitungszugaben; einzuhaltende Toleranzen), die Oberflächengüte und den Werkstoff sowie die herzustellende Stückzahl, die voraussichtliche Produktionsdauer und die gleichzeitig zu fertigende Losgröße.

Die Ökonomie des Fertigungsprozesses erfordert den Zeitaufwand der Herstellung so gering wie möglich zu halten, dabei eine hohe Auslastung der Maschinen zu sichern (Grundfondsökonomie) und eine hohe Ausnutzung des Materials (der Werkstoffe) zu sichern (Materialökonomie). Dementsprechend müssen die erforderlichen Fertigungsverfahren nach technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgewählt werden. Technologische Auswahlkriterien vergleichbarer Fertigungsverfahren (einschl. der zugehörigen Maschinen und Werkzeuge) sind z. B. die Formgebungsmöglichkeit, Bearbeitbarkeit des Werkstoffes, erreichbare Oberflächengüte und Genauigkeit, Leistung/Stunde, Schnittgeschwindigkeit, Druck und Temperatur, Standzeit oder Standmenge der Werkzeuge, Grad der Mechanisierung und Automatisierung. Diese Faktoren wirken direkt oder indirekt auf den Fertigungszeitaufwand für die Herstellung eines Werkstückes ein. Er ist die Basis für die Berechnung des Arbeitslohnes.

Um die Wirtschaftlichkeitsberechnungen und -vergleiche technologischer Verfahren durchführen zu können, ermittelt man die jeweiligen *technologischen Selbstkosten* für die Bearbeitung eines Werkstücks (oder einer Gruppe ähnlicher Werkstücke).

Sie umfassen den Arbeitslohn (Basis: Fertigungszeit) und die Materialkosten (Grundmaterial) als *direkte* technologische Kosten und die anteiligen Kosten für die eingesetzten Maschinen (Abschreibungen), für die verwendeten Werkzeuge und Vorrichtungen, für die notwendige Energie und die Schmier- und Hilfsstoffe als *indirekte* technologische Kosten. Eine bestimmte Stückzahl herzustellender Teile ist vorauszusetzen

¹ Unter Beibehaltung des Oberbegriffs „Mechanische Technologie“ wurde deshalb auch das so benannte Lehrfach im Lehrplan der allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule in seiner Gliederung und Stoffauswahl inhaltlich erweitert und damit auf die Belange moderner fertigungstechnischer Prozesse in der Industrie ausgerichtet. Dementsprechend behandeln die Darlegungen dieses Abschnittes den ausgewählten Stoff nach den Ordnungsprinzipien der Fertigungstechnik.



oder muß als Grenzbereich einer Wirtschaftlichkeit ermittelt werden. Die Wirtschaftlichkeit vieler Fertigungsverfahren ist stückzahlabhängig.

Die beschleunigte Entwicklung, Anwendung und umfassende Nutzung material-, energie- und arbeitssparender technologischer Verfahren und Prozesse ist ein Grundanliegen der Intensivierung des gesellschaftlichen Reproduktionsprozesses durch sozialistische Rationalisierung und wirkt unmittelbar auf die Erhöhung der Effektivität der Produktion und Steigerung der Arbeitsproduktivität (vgl. [1], S. 25).

Das entspricht den Aufgaben, die der IX. Parteitag der SED der metallverarbeitenden Industrie stellt:

„Im Maschinenbau sind die Aufgaben für die Wissenschaft und Technik in noch stärkerem Maße auf die Rationalisierung der technologischen Prozesse sowie die Neu- und Weiterentwicklung von Maschinen und Ausrüstungen und auf die Verbesserung der Materialökonomie zu konzentrieren.

Hauptrichtungen bei der Weiterentwicklung der technologischen Prozesse sind:

Energie-, material- und zeitsparende Urformverfahren, Anwendung moderner Umformverfahren,

Erhöhung der Effektivität bei den spangebenden Verfahren, rationelle Oberflächen- und Behandlungstechnik, rationelle Füge- und Montageverfahren.“

([1], S. 56 f.). Das ist die grundlegende wissenschaftlich-technische Aufgabenstellung für die Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker in den Instituten und produktionsvorbereitenden Abteilungen der Kombinate und Betriebe. Gleichermaßen orientieren sich alle Werktätigen im sozialistischen Wettbewerb und in der Neuererbebewegung auf die Erfordernisse der Veränderung der Technologien und Verfahren mittels der sozialistischen Rationalisierung.

Wesentliche Impulse erhält die Entwicklung der Technologie durch die internationale Wissenschafts- und Produktionskooperation mit der Sowjetunion und den

anderen sozialistischen Ländern im Rahmen des RGW.

Der Auswertung und Anwendung hervorragender wissenschaftlicher und praktischer fertigungstechnischer Erkenntnisse und Ergebnisse der Produktion in der UdSSR, die unserer Industrie schon in den zurückliegenden Jahren hohen volkswirtschaftlichen Nutzen brachten, kommt auch im Fünfjahrplan 1976 bis 1980 große Bedeutung zu. Ausdruck der sozialistischen Integration sind gemeinsam verwirklichte Rationalisierungsvorhaben in den Betrieben der metallverarbeitenden Industrie der sozialistischen Länder, darunter auch in der DDR.

9.2. Hauptverfahrensgruppen und Fertigungsverfahren der Fertigungstechnik

9.2.1. Ordnung der Fertigungsverfahren

Die systematische wissenschaftliche Ordnung der Fertigungsverfahren erfolgt auf der Grundlage des DDR-Standards *Fertigungsverfahren – Einteilung der Begriffe*.¹

Fertigen heißt, aus einer dargebotenen Stoffmenge ein nach Form, Größe, Genauigkeit, Stoff und Aussehen vorbestimmtes Gebrauchsstück herzustellen. Für diese Aufgabe steht eine große Anzahl von technologischen Verfahren zur Verfügung, die es gestatten, Erzeugnisse mit bestimmten festen Formen herzustellen. Entsprechend ihren technischen Funktionen und Anforderungen werden die geforderten Parameter (Formen und Eigenschaften) der Erzeugnisse im Fertigungsprozeß im allgemeinen stufenweise in Annäherung an den Endzustand erreicht, wobei besonders geeignete technologische Grundverfahren aneinandergereiht bzw. miteinander gekoppelt werden. Jedes einzelne Verfahren bietet nur in einem bestimmten Bereich die Mög-

¹ DDR-Standard TGL 21639: Fertigungsverfahren – Einteilung der Begriffe, verbindlich ab 1. 7. 1966.



lichkeit einer wirtschaftlichen Formgebung bzw. Veränderung bestimmter technischer Eigenschaften des gewählten Werkstoffes. Die Möglichkeiten und Grenzen der Herstellung bestimmter Formen (*Hauptgeometrie*) bzw. die Herausbildung bestimmter Stoffeigenschaften, sind deshalb wichtige Kriterien einer systematischen Ordnung der Fertigungsverfahren.

Nach dem Stoffzusammenhalt und seiner Änderung erfolgt die Einteilung der Fertigungsverfahren (Übersicht 9.1.).

Alle technologischen Verfahren, die für die Fertigung geeignet sind, lassen sich nach TGL 21 639 folgenden Hauptgruppen zuordnen:

Urformen ist Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts.

Hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung, z. B. Gießen, Pressen von Metallpulvern, Galvanoplastik.

Umformen ist Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten, z. B. Stauchen, Fließpressen, Abkanten.

Trennen ist Fertigen durch Ändern der

Form eines festen Körpers, wobei der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, d. h. im ganzen vermindert wird, z. B. Abschneiden, Drehen, Bohren, Erodieren.

Fügen ist das Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken oder von Werkstücken mit formlosem Stoff, z. B. Schrauben, Falzen, Schweißen, Löten.

Beschichten ist das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück, z. B. Anstreichen, Auftragschweißen, Galvanisieren.

Stoffeigenschaftändern ist Fertigen eines festen Körpers durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen, wobei eine etwaige unwillkürliche Formänderung nicht zum Wesen des Verfahrens gehört, z. B. Härten, Festwalzen, Entkohlen, Aufkohlen¹.

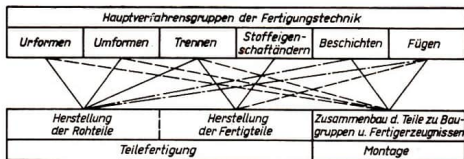
Die naturwissenschaftliche Charakteristik der Verfahren (auch als innere Verfahrensmerkmale bezeichnet) ist in diesem Ordnungssystem der Gliederung nach den erreichbaren geometrischen oder stofflichen Veränderungen untergeordnet.

Die vielfältigen Anwendungs- und Kombinationsmöglichkeiten dieser technologischen Grundverfahren der Fertigungstechnik zeigen sich in den Beziehungen zur speziellen Technologie eines Industriebereiches. Innerhalb der

¹ siehe ausführlich DDR-Standard TGL 21 639

Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren	
1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten
Formschaffen	6. Stoffeigenschaftändern			
	Umlagern von Stoffteilchen	Aussondern von Stoffteilchen	Einbringen von Stoffteilchen	

Übersicht 9.1.: Einteilung der Fertigungsverfahren (nach TGL 21 639)



Technologie des Maschinenbaus

Übersicht 9.2.: Beziehungen zwischen den Verfahrensgruppen der Fertigungstechnik und der Technologie eines Industriebereiches



einzelnen Verfahrensgruppen gibt es solche technologischen Verfahren, die im gesamten Bereich der metallverarbeitenden Industrie eingeführt sind, andere technologische Verfahren haben sich nur bei bestimmten spezifischen Fertigungsaufgaben bewährt und haben dort einen besonders starken Anteil am Fertigungsprozeß. Das dominierende Anwendungsfeld der genannten Verfahrensgruppen in den typischen Hauptstufen oder -stadien der Technologie des Maschinenbaus ist in Übersicht 9.2. dargestellt.

9.2.2. Urformen

9.2.2.1. Merkmale und Einteilung

Die Urformung geometrisch bestimmter fester Körper erfolgt u. a.

- aus dem schmelzflüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand von Stoffen (z. B. beim Gießen);
- aus dem festen (körnigen oder pulverisierten) Zustand von Stoffen (z. B. in der Pulvermetallurgie);
- durch elektrolytische Abscheidung von Stoffen (z. B. bei der Galvanoplastik).

Die Formgebungsmöglichkeit dieser Verfahrensgruppe gestattet es, einen sehr großen Formenreichtum auszubilden. Es lassen sich der Form nach sowohl einfache als auch komplizierte Werkstücke aus den verschiedensten Werkstoffen mit einer weitgehenden Annäherung an das Fertigteil herstellen.

Typische Werkstoffe, die mittels der Grund-

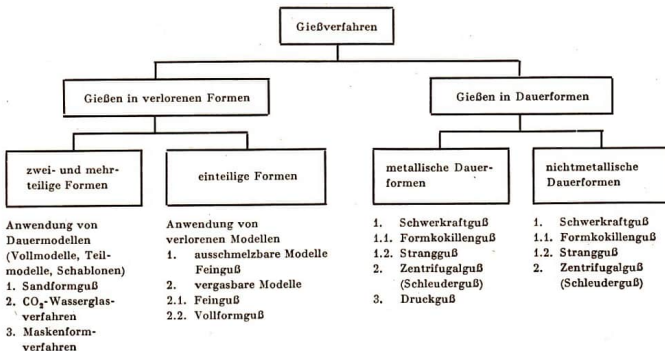
verfahren der Urformung verarbeitet werden, sind

- metallische Gußwerkstoffe,
- Duro- und Thermoplaste,
- Metallpulver.

Durch Urformung gefertigte Werkstücke (sowohl Roh- teile als auch z. T. einbaufertige Teile) finden bei der Herstellung von Maschinen, Geräten, Apparaten und technischen Industriewaren für den Bevölkerungsbedarf eine breite Anwendung. Gußwerkstücke haben nach wie vor einen relativ hohen Anteil an der Gesamtmasse von Maschinen, Geräten und anderen Erzeugnissen der metallverarbeitenden Industrie.

Ordnung der Gießverfahren. Die Ordnung der Gießverfahren erfolgt vorrangig nach der Art der Herstellung und dem Zustand der verwendeten Formen, da die Qualität der Form weitgehend die Genauigkeit und Oberflächengüte des Gußstückes bestimmt. Man unterscheidet Gießverfahren, deren Formen nach dem Abguß zerstört werden und folglich nur einmal verwendet werden können (verlorene Formen), und Gießverfahren, deren Formen für den Abguß mehrerer Gußstücke eingesetzt werden (Dauerformen).

Einen Überblick über die diesen Gruppen zugeordneten Gießverfahren vermittelt Übersicht 9.3.



Übersicht 9.3.: Ordnung der Gießverfahren

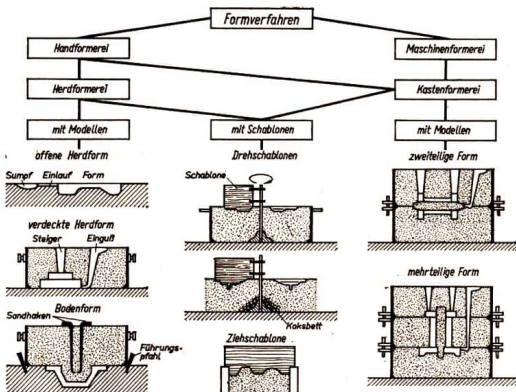


Bild 9.4.
Formverfahren
beim Sandformguß

9.2.2.2. Charakteristische Merkmale wichtiger Gießverfahren

Sandformguß. Der Sandformguß hat gegenwärtig noch den größten Anteil an der Gußherstellung (ca. 80% der erzeugten Gußmasse in der DDR).

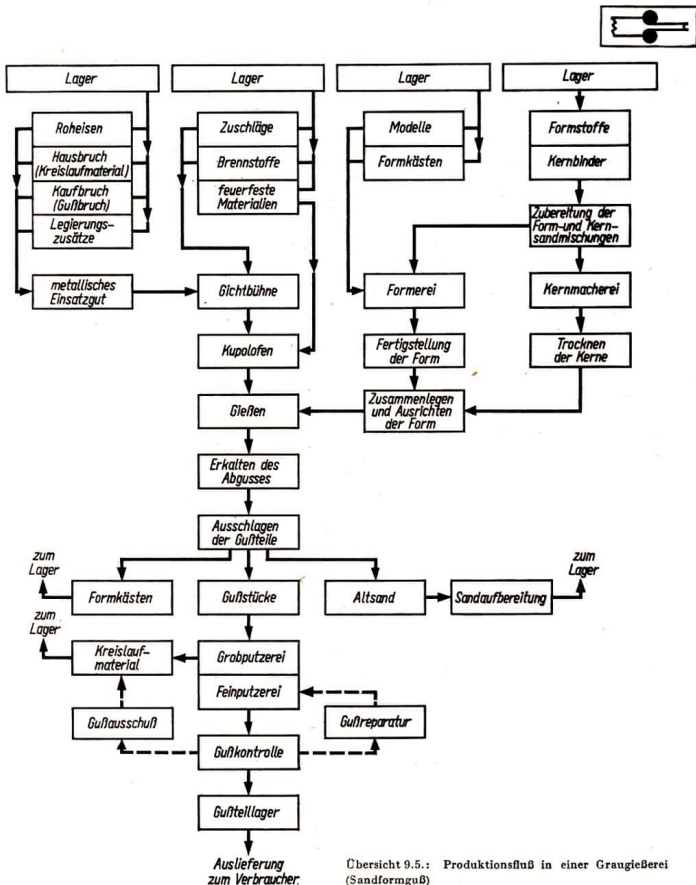
Die äußeren Konturen des zu fertigenden Gußstückes werden bei diesem Verfahren in einer zwei- oder mehrteiligen Sandform abgebildet. Die Ausbildung des Formhohlraumes erfolgt mittels Modellen aus Holz, Metall, Gips und neuerdings auch aus Plasten und in geeigneten Fällen mit Dreh- und Zieherschablonen. Das Einfüllen der Modelle wird überwiegend in Formkästen, bei großen oder sehr einfachen Gußstücken im Gießereiherd (Sandboden oder Sandgrube der Gießerei) vorgenommen (Bild 9.4.).

Der gesamte Produktionsfluß in einer herkömmlichen Sandformgießerei für Grauguß ist in Übersicht 9.5. dargestellt.

An die Sandform werden hohe Ansprüche hinsichtlich der Stabilität, Festigkeit, Wärmebeständigkeit u. a. beim Abguß ge-

stellt. Davon hängt letztlich die Qualität des Guß-Rohteiles ab (Genauigkeit, Einhaltung bestimmter Wanddicken, Oberflächenbeschaffenheit). Zu diesem Zweck werden dem Sand sowohl für die Formen- wie auch Kernherstellung bestimmte Binder zugesetzt. Die Standfestigkeit der Formen (oder Kerne) kann durch Verdichten (Rütteln, Stampfen, Pressen) oder mittels moderner chemischer Verfestigungstechnologie (chemische Binder unter Zusatz von Härtern, die mit dem Sand zu einem Erstarrungsprozeß führen) erfolgen. Verfestigungsverfahren ermöglichen meist eine Einsparung von Sand (sandarme Verfahren) und sind Genaußverfahren. Sie erfahren eine zunehmende Anwendungsbreite und stehen in verschiedenen Varianten zur Verfügung. Nachfolgend werden einige ausgewählte Verfestigungsverfahren dargestellt.

CO₂-Wasserglas-Verfahren. Das CO₂-Verfahren ist ein Genaußverfahren, welches für die Fertigung von Formen in der Stahlgußproduktion (Masse der Gußstücke bis 150 kg) und für die Kernherstellung bei Stahl- und Grauguß eingesetzt wird.



Es gewährleistet eine gute Oberflächenbeschaffenheit der Gußstücke. Der Formstoff setzt sich aus reinem Quarzsand und 4 bis 5 Gewichtsprozenten Wasserglas (Na_2SiO_3 oder K_2SiO_3) zusammen. Die Form

bzw. der Kern wird in der herkömmlichen Weise verdichtet, dann mit CO_2 durchblasen, wobei es in kurzer Zeit zu einer Aushärtung mit hoher Standfestigkeit kommt. Danach wird das Modell entfernt, und die



Form ist abgußfertig und kann auch gelagert werden.

Maskenformverfahren. Es ist ein sandarmes Genaußverfahren zur Herstellung von Gußteilen mit einer Masse von 0,05 kg bis 150 kg. Der Formstoff besteht aus feinem Quarzsand und einem Phenol-Kunstharz-Binder oder Furanharz-Binder in einem Masseanteil von etwa 5 Prozent. Man verwendet entweder Quarzsand-Kunstharzpulver-Gemische oder harzummüllten Sand. Das Prinzip des Verfahrens besteht darin, daß statt der massiven Sandform schalenförmige Formteile (zweiteilige Formen) mit einer Dicke bis zu 10 mm hergestellt und zusammengefügt werden.

Das Formen der Masken (auch von geblasenen Hohlkernen) erfolgt auf speziellen Formmaschinen mit erwärmten Metall-Modell-Platten. Das aufgeschüttete Formstoffgemisch backt auf der Modellplatte je nach Einwirkungsdauer (meist etwa 60 Sekunden) bei einer Temperatur von 250 °C zu einer teigigen Maske zusammen und wird dann bei etwa 450 °C ausgehärtet. Zwei noch warme Maskenhälften werden anschließend (eventuell nach Einlegen von Kernen) zusammengeklebt oder -geklammert. Damit ist die Maskenform fertig und kann nach dem Einsetzen in Gießkästen mit Hinterfüllung von Kies oder Stahlkies (zur Verhinderung des Treibens der Form) abgegossen werden. Die Herstellung der gesamten Form dauert etwa 2 bis 3 Minuten.

Der hohe Mechanisierungsgrad dieses Verfahrens erfordert eine Massenfertigung von Gußteilen, wobei die untere Grenze bei etwa 3000 Stück im Jahr liegt.

Vorteile des Verfahrens gegenüber dem Sandformguß: Erhöhung der Arbeitsproduktivität und Flächenleistung (infolge kleinen Platzbedarfes) auf etwa das Vierfache, geringer Formsandbedarf, Einsparung an Formkästen, niedrige Transportkosten, geringer Aufwand für Putzarbeiten u. a., hohe Maßgenauigkeit und gute Bearbeitungsmöglichkeit der Gußstücke.

Das Maskenformverfahren findet bei Grauguß und Stahlguß seine Anwendung und gestattet insbesondere die Herstellung dünnwandiger Gußstücke.

Feinguß. Mit dem Feingußverfahren können Genaußteile in ungeteilten Formen hergestellt werden. Das Modell wird dabei ausgeschmolzen oder vergast.

Es ist vorrangig geeignet für hochlegierte Stähle oder Metalle mit sehr hohem Schmelzpunkt. Gegenwärtig können Gußteile mit einer Stückmasse von etwa 1 g bis etwa 5 kg abgegossen werden, wobei für die Wirt-

schaftlichkeit eine Großserien- oder Massenfertigung vorausgesetzt wird.

Ein durch Spritzen oder Pressen in Metallformen gefertigtes Modell aus Wachs oder Polystyrol wird mehrmals in eine Silikatmasse getaucht (oder damit besprüht), bis sich eine Schicht von mehreren Millimeter Dicke gebildet hat. Dann wird diese Schicht bei Temperaturen um 100 °C getrocknet, wobei das Wachsmo- dell aus- schmilzt (Wachs wird zu etwa 80 Prozent zurückgewonnen) bzw. das Polystyrol ver- brennt. Die verbleibende einteilige Form- hülle wird gebrannt und zum Abguß bereit- gestellt.

Vorteile des Verfahrens: hohe Maßhaltigkeit, geringe Wanddicke und ausgezeichnete Oberflächengüte der Gußteile, die nicht durch andere Formverfahren erreicht werden; Herstellung von komplizierten Werkstücken, die nur geringer Nacharbeit bedürfen und durch Schmieden oder Spanen nur sehr schwer geformt werden können; geringe Spanungsverluste.

Das Verfahren hat sich bei der Fertigung folgender Teile bisher besonders bewährt:

Schneidwerkzeuge (z. B. Fräser aus hochlegiertem Werkzeugstahl), Kleinteile für Jagdwaffen, chirurgische Instrumente.

Formkokillenguß. Formkokillenguß ist ein Genaußverfahren für Eisen-, Schwer- und Leichtmetalle in metallischen Dauerformen. Das Gießen erfolgt mit Schwerkraftwirkung.

Die Zahl der Abgüsse je Kokille beträgt je nach Größe und Schwierigkeitsgrad des Gußstückes im Durchschnitt 500 bis 2000 Stück, in besonderen Fällen sogar 4000 bis 5000 Stück. Die Masse der herstellbaren Gußstücke liegt zwischen 0,5 kg bis 6000 kg und mehr. Wegen der Kosten für die Herstellung der Kokillen ist das Verfahren vor allem in der Serien- und Massenfertigung wirtschaftlich.

Vorteile des Verfahrens: geringer Arbeitsaufwand für Vorbereitung der Form, sandloses Formverfahren, Zeiteinsparungen für das Ausleeren, Putzarbeiten entfallen bzw. sind sehr gering, Sandtransport und -aufbereitung für Formherstellung entfällt, hohe Arbeitsproduktivität, geringer Ausschuß (< 2 %).

Kokillengußteile weisen ausgezeichnete mechanische Festigkeitswerte auf und haben ein feinkörniges, dichtes und druckfestes Gefüge. Die Abgüsse haben eine saubere und glatte Oberfläche und eine hohe Maßgenauigkeit mit geringen Bearbeitungszugaben.

Druckguß. Druckgußverfahren ermöglichen die Herstellung von Gußteilen aus NE-Metallen, besonders Leichtmetall-Legierungen,



mit einer Masse von wenigen Gramm bis etwa 35 kg bei sehr hohem Genauigkeitsgrad (bis $\pm 0,005$ mm). Es können einbaufähige Teile (Fertigteile) mit einfacher und komplizierter Gestalt und geringen Wanddicken (ab 0,5 mm) gegossen werden.

Die ausschließliche Fertigung dieser Teile in speziellen Druckgießmaschinen und die hohen Kosten der meist zwei- oder mehrteiligen Stahlformen setzen wirtschaftlich eine Großserien- und Massenfertigung voraus.

Druckgießen ist ein Gießverfahren, bei dem das flüssige oder teigige Metall unter hohem Druck (Preßdruck bis 350 MPa) in die Präzisionsdauerform aus Stahl gepreßt wird. Die Verwendungsdauer (Lebensdauer) der Stahlformen wird nach der herstellbaren Stückzahl (Schuß) angegeben. In Abhängigkeit vom Gußwerkstoff wird eine Haltbarkeit im Durchschnitt bis zu 100 000 Schuß, in Sonderfällen bis zu 500 000 Schuß ausgewiesen.

Vorteile des Verfahrens: hohe Werkstoffersparnis gegenüber anderen Gießverfahren, geringe oder keine Nachbearbeitung der Teile, Austauschbarkeit der Gußstücke, hohe Arbeitsproduktivität, geringer Arbeitskräftebedarf, da Druckgießmaschinen weitgehend mechanisiert bzw. automatisiert sind.

9.2.2.3. Pressen und Sintern von Metallpulvern

Der Forderung nach Einbaufähigkeit der Erzeugnisse ohne wesentliche Nacharbeit entspricht die Fertigung von Bauteilen durch Pressen und Sintern von Metallpulvern. So können z. B. Bauteile für den Maschinen-, Apparate- und Gerätebau, für die Kraftfahrzeugindustrie usw. kostensparend gefertigt werden.

Prinzip ist, Metallpulver in beliebigem Mischungsverhältnis mit Legierungselementen und Gleitmitteln – jedoch genau dosiert – in eine Form zu bringen und unter hohem Druck zu verdichten. Die erforderliche Preßkraft ist abhängig von der gewünschten Dichte des Erzeugnisses. Diese Preßlinge werden anschließend in einem Ofen unter Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum gesintert. Sintern ist eine Wärmebehandlung kurz unterhalb des Schmelzpunktes. In vielen Fällen sind die Teile nach dem Entgraten sofort einbaufähig, da sie hohe Genauigkeiten aufweisen. Werden noch höhere Genauigkeiten gefordert, können die Teile kalibriert oder auch spanend nachgearbeitet werden. Eine hohe Stückzahl ist jedoch Bedingung, da die Formkosten sehr hoch liegen. Festigkeit und Größe der nach diesem Verfahren zu fertigenden Bauteile sind dagegen begrenzt.

9.2.3. Umformen

9.2.3.1. Merkmale und Einteilung

Die Verfahren der Umformung metallischer Werkstoffe (Umformtechnik) sind insgesamt dadurch gekennzeichnet, daß bei der Ausbildung der gewünschten Gestalt (Hauptgeometrie) im Werkstoff eine gegenseitige Verschiebung von Stoffteilchen unter Wirkung ihres Zusammenhangs erfolgt.

Die metallischen Werkstoffe gestatten eine Umformung im kalten oder warmen Zustand; deshalb ist es üblich, zwischen Verfahren der *Kalt- und Warmumformung* zu unterscheiden. Eine Reihe von Verfahren bietet die Möglichkeit, die Umformung sowohl im kalten als auch im warmen Zustand zu vollziehen, z. B. Walzen, Fließpressen, Prägen.

Eine Gruppierung der Verfahren unter dem Gesichtspunkt der Ausgangsform des Werkstoffes vor der Umformung führt zu der Unterteilung in *Massiv- und Blechumformung*.

Die Charakteristik der Umformverfahren ist jedoch vor allem gekennzeichnet durch die physikalischen Kraftwirkungen, die zwischen der Umformmaschine (bzw. -werkzeug) und dem Werkstück auftreten und zu bestimmten Festigkeitsbeanspruchungen des Werkstoffs im Umformprozeß führen. Darüber hinaus beeinflussen diese technisch-physikalischen Vorgänge auch bestimmte Eigenschaften des umgeformten Werkstückes. Man unterscheidet hierbei Druck-, Zug-, Biege- und Verdrehungsbeanspruchungen in der Umformzone (Bild 9.6.). Die Grundverfahren des Umformens können variiert und kombiniert werden.

9.2.3.2. Technologische Erfordernisse der Umformung

Der erreichbare Umformungsgrad eines herzustellenden Rohteils ist vorrangig von der Zusammensetzung und Gefügestruktur des verwendeten Werkstoffes, seinen Festigkeitseigenschaften und der Temperatur, bei der die Umformung vorgenommen wird, abhängig (vergleiche dazu Seiten 119 bis 130).

Die Vorteile der Umformtechnik liegen nicht nur in der Volumenkonstanz der eingesetzten



Grund- umformung	Nr.	Verfahren ■ Umformzonen
Verdrängen (Druck)	1	Stauchén im geschlossenen Gesenk
	2	Gesenkschmieden
		Vollprägen
	3	Stauchén im offenen Gesenk
	4	Strangpressen
		Verlängen
		Fließpressen
	5	Formwalzen
		Glatt- u. Festwalzen
	6	Flachwalzen
Ziehen (Zug)	7	Recken
		Drücken
	8	Abstrecken durch Drücken
	9	Treiben
	10	Rundkneten
	11	Drahtziehen
		Profilziehen
	12	Tiefziehen
	13	Abstrecken durch Ziehen
	14	Hohlprägen
Biegen (Biegemoment)	15	Streckziehen
	16	Biegen um gerade Kanten
	17	Biegen um krumme Kanten, Bündeln
Verdrehen (Drillmoment)	18	Schränken

Bild 9.6. Ordnung der Umformverfahren nach Kienzle

Masse des Werkstoffes, der weitgehenden Annäherung des Rohteils an das Fertigteil, sondern auch in der Erzielung von Gestaltseigenschaften der Teile, die z. B. durch spanende Formung nicht erreicht werden.

Die letztgenannte Erscheinung ist dadurch bedingt, daß alle in der Umformtechnik eingesetzten Halbzeuge (Schmiedeknüppel, Profilstahl, Draht, Bleche) durch die vorlaufenden Umformprozesse eine sogenannte Walzfaser aufweisen. Die Festigkeitswerte des Werkstoffes liegen in Richtung der Walzfaser erheblich höher als quer zur Faserrichtung. Deshalb wird in der Umformtechnik die Erhaltung dieser Walzfaser in der geometrischen Form des herzustellenden Teiles angestrebt. Da die geometrische Gestalt der Umformteile durch einen flächenförmigen Angriff der verwendeten Werkzeuge herausgebildet wird, vollziehen sich die technologischen Prozesse überwiegend in mehreren Stufen. Prinzipiell werden bei der Umformung drei Phasen des technologischen Prozesses unterschieden: *Ausgangsformung*, *Zwischenformung* und *Endformung*.

Die *Ausgangsformung* dient der Vorbereitung des Werkstoffes zur Umformung, wobei die der Masse des Werkstoffes entsprechenden Werkstoffteile einschließlich der technologisch bedingten Werkstoffzugaben in Form von Halbzeugabschnitten (Blöckchen, Platinen, Ronden) durch zweckmäßige technologische Verfahren (besonders des Trennens) zubereitet werden.

Die *Zwischenformung*, oftmals in mehreren Stufen, umfaßt die richtige Masseverteilung, die Querschnittsvorbildung und notwendige Biegevorgänge.

Die *Endformung* bildet das Umformteil mit den geforderten Toleranzen in seiner geometrisch bestimmten Gestalt aus. Nur relativ einfache Teile lassen sich aus einer Ausgangsform sofort in die gewünschte Endform bringen.

Die Auswahl der Zwischenformen ist nicht nur durch den erreichbaren Umformungsgrad des Werkstoffes und durch die Umformmaschinen mit begrenzten Preßkräften bedingt, sondern auch durch die notwendige Schonung der Endformwerkzeuge, die im allgemeinen einen hohen Material- und Lohnaufwand zu ihrer Herstellung erfordern. Mehrere Stufen der Zwischenformung erhöhen allerdings den gesamten Werkzeugbedarf. Bereits hieraus läßt sich ableiten, daß die meisten Verfahren der Umformtechnik wegen des hohen Aufwandes für die Werkzeugherstellung nur unter den Bedingungen der Serien- und Massenfertigung wirtschaftlich sind.



9.2.3.3. Charakteristische Merkmale wichtiger Umformverfahren

Schmieden. Beim Schmieden werden Eisenwerkstoffe und NE-Metalle durch Verdrängen (Schlag- oder Preßdruck) vorwiegend im warmen Zustand umgeformt. Man unterscheidet in Abhängigkeit von der Formbestimmtheit des Werkzeuges das *Freiformschmieden* und das *Gesenkschmieden*.

Freiformschmieden ist ein Umformen des Werkstoffes zwischen Schmiedesätteln (Ober- und Untersattel), wobei keine geschlossene Form vorhanden ist. Als Ausgangsmaterial für das Freiformschmieden werden Rohblöcke, Schmiedeknüppel und profiliertes Halbzeug eingesetzt. Nach dem Erwärmen wird das Ausgangsmaterial durch die verschiedensten Formgebungsvorgänge (Stauchern, Breiten, Recken, Absetzen, Durchsetzen u. a.) zum endgültigen Schmiedestück geformt.

Freiformschmiedestücke haben hohe Bearbeitungszugaben und bedürfen deshalb einer großen Nachbearbeitung, die mit hohen Werkstoffverlusten verbunden ist (bis zu 80 Prozent der Masse des Einsatzmaterials). Großschmiedestücke und mittlere sowie kleine Schmiedestücke der Einzelfertigung werden mit diesem Verfahren hergestellt.

Maschinen für das Freiformschmieden:

- Lufthämmer (von 0,4 kJ bis 50 kJ Schlagarbeit);
- hydraulische Schmiedepressen (2,5 MN bis 150 MN Preßkraft).

Gesenkschmieden ist ein Umformverfahren, bei dem der erwärmte Werkstoff in eine zweiteilige Werkzeugform (Gesenk) aus legiertem Stahl gedrückt wird, die in ihren Konturen der Form des herzustellenden Gesenkschmiedestückes entspricht (Bild 9.7.a).

Das Gesenk besteht aus Ober- und Unterteil, in beide ist eine Gravur (Form des Schmiedestückes) eingearbeitet. Gesenkschmiedestücke einfacher Gestalt werden nach zweckmäßiger Wahl der Ausgangsform sofort in die Fertiggravur geschlagen oder gepreßt, komplizierte Schmiedestücke werden in stetiger Annäherung an die Endform in Zwischenform-Gesenken (oder auch durch Freiformschmieden) vorgeformt. Bei Verwendung herkömmlicher Gesenke entsteht zwischen den Gesenkteilen ein Grat, der nach dem Endformen mechanisch entfernt wird. Genauschmiedestücke (mit sehr geringen Bearbeitungszugaben) erfordern Gesenkgravuren hoher Genauigkeit und guter Oberflächenbeschaffenheit.

Gratloses Gesenkschmieden in geschlossenen Gesenken ohne Gratbildung erfordert eine

hohe Übereinstimmung zwischen dem Volumen des Ausgangswerkstoffes und dem Volumen des Gesenkgravur. Geringen Materialüberschuß läßt man in geeignete Formelemente des Rohteils abfließen.

In einem Gesenk können 2000 bis 4000 Schmiedestücke (Standmenge) hergestellt werden, bei besonderer Behandlung der Gravuroberfläche (z. B. Strahlglätten, Verchromen) steigt die Standmenge bis zu 10000 Stück. Die Grenze des Verfahrens liegt gegenwärtig bei einer Masse des Gesenkschmiedestückes von 2000 kg.

Maschinen für das Gesenkschmieden:

- Riemen-, Ketten-, Brettfallhämmer (0,4 kJ bis 120 kJ Schlagarbeit);
- Gegenschlaghämmer (30 kJ bis 1250 kJ Schlagarbeit);
- Spindelpressen (0,25 MN bis 50 MN Preßkraft);
- Kurbelpressen (2,5 MN bis 25 MN Preßkraft);
- hydraulische Schmiedepressen (8 MN bis 100 MN Preßkraft und größer).

Fließpressen. Das Fließpressen ist ein Verfahren der Massivumformung, bei dem der Werkstoff in kaltem oder warmem Zustand mittels eines Stempels in den Spalt zwischen diesem und einer umhüllenden Stahlform oder durch einen profilierten Durchbruch im Boden der Form gepreßt wird.

Man unterscheidet das *Vorwärtsfließpressen* (Werkstoff fließt in Stempelrichtung) und das *Rückwärtsfließpressen* (Werkstoff fließt entgegen der Stempelrichtung) und die Kombination der vorgenannten beiden Arten (kombiniertes Fließpressen (Bild 9.7.b)). Geeignete Werkstoffe für das Fließpressen sind NE-Metalle (Zn, Sn, Cu, Cu-Legierungen, Al, Al-Legierungen), neuerdings aber auch Kohlenstoffstähle und legierte Stähle.

Es können symmetrische und unsymmetrische Voll- und Hohlkörper mit unterschiedlicher Bodendicke und Wanddicken (0,5 mm bis 15 mm) geformt werden. Es werden Teile mit einer Masse bis zu 50 kg (Stahl) bzw. bis zu 20 kg (NE-Metalle) hergestellt. Fließgepreßte Teile haben hohe Festigkeitswerte, eine vorzügliche Oberflächengüte und können mit geringen Bearbeitungszugaben gefertigt werden bzw. ergeben einsatzfähige Werkstücke.

In Abhängigkeit von den Anforderungen an Form, Oberfläche und Genauigkeit und unter Berücksichtigung der Werkzeugkosten werden wirtschaftliche Stückzahlen zwischen 2000 und 10 000 Stück genannt.

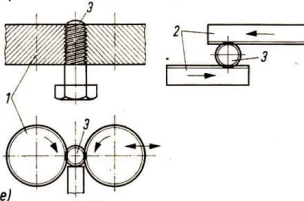
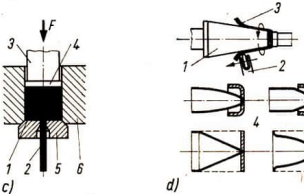
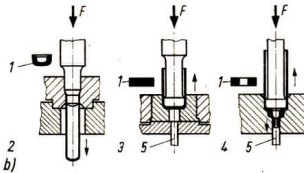
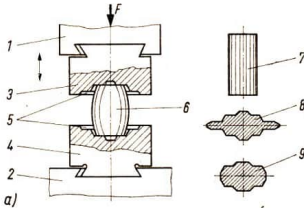
Walzen. Das Umformen durch Walzen hat ebenfalls das Verdrängen des Werkstoffes zum Prinzip. Man kann drei Gruppen von Verfahren unterscheiden:

- a) *Flachwalzen* von Blechen und Bändern sowie *Formwalzen* von Formstangen und



Bild 9.7. Verfahren der Massivumformung — Prinzipdarstellung

- a) Gesenkschmieden
- b) Fließpressen
- c) Strangpressen
- d) Fließdrücken
- e) Gewindewalzen



Erläuterung zu Bild 9.7.

- a) Gesenkschmieden: 1 bewegliches Pressenoberteil (Laufholm), 2 Pressenschabotte (Amboß), 3 Gesenkboberteil, 4 Gesenkkunterteil, 5 Gesenkgravur mit Gratrille, 6 erwärmter Werkstoff, 7 Ausgangsform, 8 Gesenkschmiedestück mit Gratansatz, 9 fertiges Gesenkschmiedestück
- b) Fließpressen: 1 Rohblock, 2 Strangpreßprofil, 3 Druckstempel, 4 Preßplatte, 5 Matrize, 6 Rezipient
- c) Strangpressen (direkt): 1 Rohblock, 2 Strangpreßprofil, 3 Druckstempel, 4 Preßplatte, 5 Matrize, 6 Rezipient
- d) Fließdrücken: 1 Drückdorn, 2 Drückwalze, 3 abgestrecktes Fließdrückteil, 4 Arbeitsbeispiele
- e) Gewindewalzen: 1 Rundwerkzeuge, 2 Flachbacken, 3 Gewindestück

Rohren überwiegend in warmem, aber auch in kaltem Zustand des Ausgangsmaterials als zweite Verarbeitungsstufe zur Herstellung von Halbzeugen in der metallurgischen Industrie;

- b) *Reckwalzen* von Zwischenformen für Gesenkschmiedestücke und
- c) *Ringwalzen* vorgeschmiedeter Rohteile für das Warmformen von Massivteilen;
- d) *Profilwalzen* zur Formung von Gewinden, Verzahnungen und anderen Profilen sowie *Glatt- und Festwalzen* zur Glättung oder Verfestigung vorgearbeiteter dünner Oberflächenschichten in kaltem Zustand.

Das Profilwalzen von Gewinden zwischen Flachbacken oder Rundwerkzeugen ist z. B. ein bewährtes Verfahren, das außer der Erhöhung der Dauerfestigkeit, vorzüglicher Oberflächengüte, geringen Toleranzen der Herstellung zu einer wesentlichen Verkürzung der Bearbeitungszeit gegenüber der spanenden Gewindeformung führt.

Fließdrücken. Zu den Verfahren, bei denen die Formgebung durch Werkstoffverdrängung erfolgt, zählt weiterhin das Drücken zur Herstellung rotationssymmetrischer Werkstücke.

Beim herkömmlichen *Drücken* wird eine Blechrolle als Ausgangsform mittels eines Drückstahls über eine Form gedrückt, wobei sich das Blech bei Verringerung seiner Dicke an die Form anlegt (Bild 9.8.a). Vom *Fließdrücken* spricht man dann, wenn die Ausgangsform (Bild 9.7.d) ein vorgefertigtes Hohlteil ist und relativ dicke Wände des Hohlteiles eine achsparallele Werkstoffverschiebung (Abstrecken) erfah-



ren, die zu einer wesentlichen Verminderung der Wanddicke führen.

Dieses Verfahren ermöglicht eine wirtschaftliche Umformung von Werkstoffen, die nicht tiefziehfähig sind. Unter Umständen kann das Abstrecken auch in warmem Zustand des Werkstoffes vorgenommen werden. Für dieses Verfahren sind spezielle Druckmaschinen entwickelt worden.

Ziehen. Außer beim Ziehen von Draht, Formstangen und Rohren als Massivumformung der zweiten Verarbeitungsstufe der Halbzeugherstellung werden Umformverfahren mit vorherrschender Zugbeanspruchung des Werkstoffes vor allem bei der Blechumformung eingesetzt. Man unterscheidet:

Tiefziehen (ohne wesentliche Veränderung der Werkstoffdicke);

Streck- oder Reckziehen (mit besonders starker Dehnungsbeanspruchung des Werkstoffes);

Abstreckziehen (mit Verminderung der Dicke des Werkstoffes).

Beim *Tiefziehen* wird ein Zuschnitt aus Blech (Ronde oder Platine) mittels eines Ziehstempels durch einen Ziehring gezogen, wobei ein Hohlteil beliebigen Querschnitts (rund, rechteckig, unsymmetrisch) geformt werden kann. Der Grad der Umformung in einem Zug wird durch Dicke und Zusammensetzung des Werkstoffes und die Form (besonders Querschnitt) des herzustellenden Teiles bestimmt (Bild 9.8.b). Die Endform des Tiefziehteiles kann in bestimmten Fällen nur über mehrere Zwischenformen (Züge) erreicht werden (Bild 9.8.c). Für dieses Verfahren sind besondere Ziehwerkzeuge erforderlich, die in Tiefziehpressen eingesetzt werden (Kurbel-, Kniehebel-, hydraulische Tiefziehpressen, Stufen-Umformautomaten). Der elastische Niederhalter, mechanisch oder hydraulisch betätigt, bewirkt ein Fließen des Werkstoffes und verhindert die Faltenbildung am Ziehteil.

Eine praktisch erprobte Variante des Tiefziehens ist das *Ziehen mit Gummikissen* (Bild 9.8.d). Bei diesem Umformverfahren ist der Stempel durch ein Gummi- (oder PVC-) Kissen ersetzt, welches von einem kastenförmigen Preßrahmen umschlossen

ist. Als formgebendes Werkzeug dient die auf dem Pressentisch befestigte Matrice. Der Ziehvorgang vollzieht sich nach dem in Bild 9.8.b gezeigten Prinzip, wobei das Gummikissen das Blech über die Matrice zieht. Der Vorteil besteht darin, daß nur ein einteiliges Formwerkzeug erforderlich ist, während der Preßrahmen mit Gummikissen für mehrere Formmatrizen verwendet werden kann. Dieses Verfahren läßt sich mit Schneid- und Lochoperationen kombinieren, so daß mit einem Arbeitshub geformt, gelocht und ausgeschnitten werden kann.

Beim *Streck- oder Reckziehen* werden schmale oder großflächige Bleche in Spannbacken fest eingespannt und mittels eines Formklotzes, der mit einem Preßkolben gegen das gespannte Blech drückt, als Hohlteile geformt (Bild 9.8.e).

Biegen. Beim Biegen von Blechen und anderen profilierten Halbzeugen (Rundmaterial, Rohre, Winkelprofile u. a.) treten an der Biegekante Zug- und Druckspannungen im Werkstoff auf, die in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Werkstoffes die Einhaltung eines minimalen Biegeradius erfordern. Die Blechverarbeitung und andere Bereiche der Metallbearbeitung erfordern vielfältige einfache und komplizierte Biegevorgänge, für die Biegewerkzeuge und Blechbiegemaschinen in den verschiedensten Varianten zur Verfügung stehen.

Typische Verfahren des Blechbiegens sind

- a) Abkanten von Blechzuschnitten zu Blechprofilen auf Biegestanzwerkzeugen und Abkantmaschinen (Bild 9.8.f);
- b) Rollbiegen auf Rollwerkzeugen (Bild 9.8.g);
- c) Rundbiegen zwischen Walzen (Bild 9.8.h).

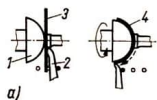
In der Stanzerietechnik finden wir häufig Werkzeuge, bei denen Biege-, Zieh- und Schneidvorgänge in einem Werkzeug kombiniert sind. Für das Rohr- und Stahlprofilbiegen verwendet man spezielle Maschinen.

Entwicklungstendenzen. Die Verfahren der Massiv- und Blechumformung erfahren eine ständige technische Weiterentwicklung und Vervollkommnung, wobei besonders die Erweiterung des herstellbaren Formenreichtums angestrebt wird. Insgesamt gestatten die meisten Verfahren der bildsamen For-

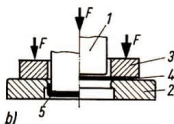


Bild 9.8. Verfahren der Blechumformung — Prinzipdarstellung

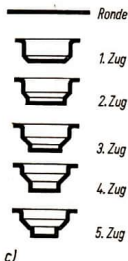
- a) Drücken
- b) Tiefziehen
- c) Tiefziehen einer Flamplatte
- d) Ziehen mit Gummikissen
- e) Streckziehen
- f) Biegen
- g) Profilbiegen
- h) Rundbiegen



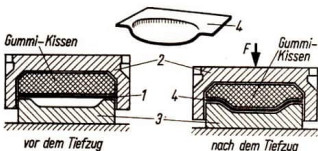
a)



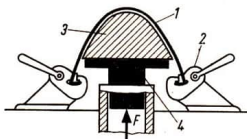
b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Erläuterung zu Bild 9.8.

- a) Drücken: 1 Drückform, 2 Drückwerkzeug, 3 Ronde (Ausgangsform), 4 Fertigteil
- b) Tiefziehen: 1 Ziehstempel, 2 Ziehrieh, 3 Niederhalter, 4 Blechronde, 5 Ziehtell
- c) Tiefziehen einer Flamplatte (Sturmlaterne): Ziehstufen
- d) Ziehen mit Gummikissen: 1 Blechzuschnitt (Ausgangsform), 2 Preßrahmen, 3 Preßform, 4 Ziehtell
- e) Streck- (Reck-) Ziehen: 1 Ziehtell, 2 Spannbacke, 3 Formklotz, 4 Preßkolben
- f) Biegen (Abkanten)
- g) Profilbiegen (Rollen)
- h) Rundbiegen mit drei Walzen

mung eine wesentlich bessere Materialausnutzung als die Verfahren der spanenden Formung.

Als Hauptrichtungen der Entwicklung der Umformtechnik treten hervor:

- a) Entwicklung von Präzisions-Umformverfahren mit engen Maßtoleranzen, geringen Bearbeitungszugaben für die nachfolgende Bearbeitung und verbesserter Oberflächengüte der Umformteile mit weitgehender Annäherung an das Fertigteil.
- b) Entwicklung von Umformverfahren, die eine technisch und wirtschaftlich günstige Umformung von neuen, hochfesten Werkstoffen gestatten.

Für die letztgenannte Richtung gewinnt besonders die Verfahrensgruppe der Hochgeschwindigkeitsumformung an Bedeutung. Die Umformung (besonders von Blechen aus rostfreiem Stahl, Titan-Legierungen, Al-Legierungen) erfolgt bei diesen Verfahren unter Ausnutzung bisher nicht üblicher hoher Drücke bzw. bei sehr hohen Umformgeschwindigkeiten.

Man unterscheidet in dieser Gruppe bisher drei Grundverfahren:

- a) Explosivverfahren: direkte oder indirekte Ausnutzung des Explosionsdruckes von Schießpulver oder Sprengstoffen ohne oder mit Zwischenschaltung eines Mediums (Flüssigkeiten, Sand);
- b) Elektrische Verfahren: Ausnutzung der Druckwelle eines elektrischen Funkens in einem mit Wasser gefüllten, geschlossenen Werkzeug zur Umformung (Hydropark-Verfahren, Unterwasserblitz); Ausnutzung des Druckes magnetischer Impulse in einem Magnetfeld zur Umformung.
- c) Expansionsverfahren: Ausnutzung der Expansion von hochoverhitztem Dampf oder Gasen im Preßzylinder von Pressen, die zu einer



hohen Beschleunigung des Preßstempels führen (Schnell-Schlag-Pressen, *Dynapak*-Verfahren); Expansion von verflüssigten Gasen (z. B. Stickstoff), die beim Übergang in den gasförmigen Zustand eine sehr schnelle Ausdehnung erfahren (Ziehen mit einem *Gasstempel*).

Eine Charakteristik dieser Verfahren gegenüber herkömmlichen gibt nachfolgender Geschwindigkeits- und Energievergleich:

Verfahren	Umformgeschwindigkeit v	frei werdende Energie je s
Explosivverfahren	250 m/s	$500\,000 \cdot 10^7$ Nm/s
Magnetverfahren	300 m/s	$160 \cdot 10^7$ Nm/s
Dynapakverfahren	40 m/s	$18 \cdot 10^7$ Nm/s
Schmiedehammer	4 m/s	$1,6 \cdot 10^2$ Nm/s
Ziehpressen	max. 0,5 m/s	—

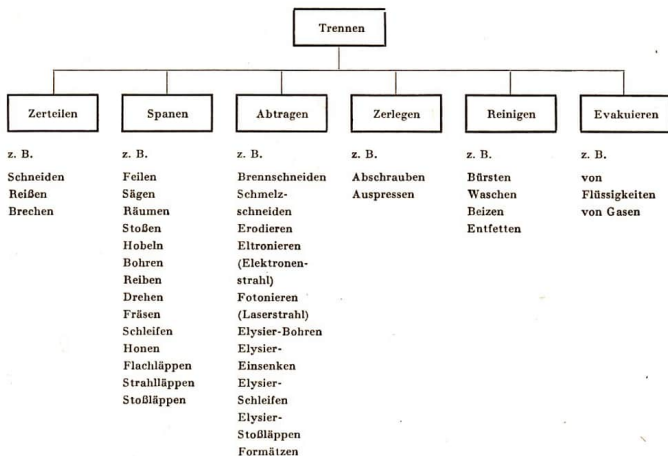
Obgleich diese modernen Verfahren gegenwärtig noch überwiegend für technologische Sonderprobleme eingesetzt werden, ist eine

Erweiterung ihres Anwendungsfeldes in der Fertigung bereits abzusehen, zumal der relativ einfache Aufbau der Werkzeuge eine Anwendung in der Einzel- und Kleinserienfertigung möglich macht.

9.2.4. Trennen

9.2.4.1. Merkmale und Einteilung

Alle Verfahren, die darauf gerichtet sind, eine Änderung der Form eines festen Körpers durch Aufheben eines lokalen stofflichen Zusammenhalts herbeizuführen, werden der Hauptgruppe Trennen zugeordnet. Eine weitere Unterteilung erfolgt u. a. in die Gruppen: Zerteilen, Spanen, Abtragen (Übersicht 9.9.). Die Grundlage aller Werkzeuge, die dem Zerteilen oder Spanen dienen, ist der Keil.



Übersicht 9.9.: Einteilung der Trennverfahren



9.2.4.2. Charakteristische Merkmale wichtiger Trennverfahren

Zerteilen. Beim Schneiden wird der Werkstoff zwischen zwei Schneiden im kalten Zustand voneinander abgesichert (meist Bleche bis zu einer Dicke max. 80 mm). Durch Schneiden mit Scher- oder Schnittwerkzeugen kann man sowohl Metalle als auch Papier, Gummi, Leder und Plaste trennen.¹

Trennen mit Scheren und Schnittwerkzeugen. Das Schneiden von Blech auf *Scheren* (offenes Schneiden) erfolgt durch Überschreitung der Scherfestigkeit des Werkstoffes zwischen zwei abgeschrägten Messern (Ober- und Untermesser). Handbetät-

tigte Scheren schneiden Blechdicken bis 3 mm, Maschinenscheren bis 80 mm.

Arten von Scheren: Handhebelscheren, Kurbelscheren, Profilstahlschneider, Knüppelscheren, Kreisscheren.

Von großer Bedeutung sind Schnittwerkzeuge mit geschlossener Schneide (*Schnitte*), die in der Blechbearbeitung besonders der Herstellung von Teilen mit sehr hoher Stückzahl dienen. Bild 9.10. zeigt eine Reihe von Schneidverfahren.

Die vielseitige Anwendung der Schnittwerkzeuge beim Schneiden von Blechen wird in ihrem konstruktiven Aufbau berücksichtigt, wobei eine Unterscheidung erfolgt

- nach der Art der Führung zwischen dem Oberteil (Stempel) und dem Unterteil (Schneidplatte) (Bild 9.11. Seite 347),
- nach der Folge von Schneidvorgängen in einem Werkzeug,
- nach der Anzahl der zugleich geschnittenen Teile,
- nach der Funktion des Schnittwerkzeuges (z. B. Abgratschnitt nach dem Gesenkschmieden, Lochschnitt),

¹ Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf das Trennen von Metallen.

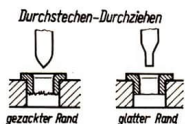
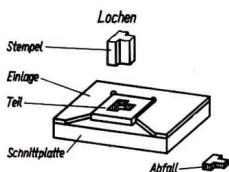


Bild 9.10. a Schneidverfahren

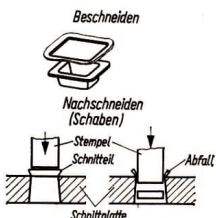
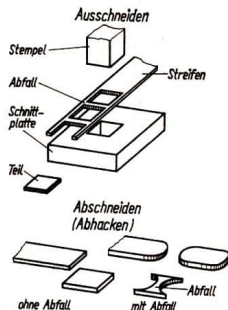


Bild 9.10. b Schneidverfahren



e) nach der Kombination von Schneid- und Umformverfahren in einem Werkzeug (in der Stanzertechnik sehr häufig).

Geeignete Maschinen für den Einsatz von Schnittwerkzeugen sind: Reibrad-Spindelpressen, Ein- und Doppelständer-Exzenterpressen, Ein- und Zweiständerkurbelpressen, Schneidautomaten mit Unterantrieb, Stufenpressen, Säulen-Handspindelpressen.

Spanen. Die Verfahren der spanabhebenden Bearbeitung nehmen in der Fertigungstechnik auch heute noch einen breiten Raum bei der Formung von Werkstücken ein. Mit spanenden Verfahren können sowohl Grob- bearbeitungen (bei Formgebung aus metallurgischen Halbzeugen meist mit hohem Werkstoffverlust verbunden) als auch Fein- bearbeitungen vorgenommen werden. Mit zunehmender Vorformung der Rohteile durch Verfahren der Ur- und Umformung bei hoher Annäherung an die Endform der Werkstücke (besonders für die Serien- und

Massenfertigung) gewinnen die Verfahren der Feinbearbeitung an Bedeutung.

Für das Spanen stehen eine große Anzahl von Verfahren und entsprechende Maschinen zur Verfügung, wobei die Grundverfahren in der Fertigungspraxis eine reiche Variationsmöglichkeit für die verschiedenen Formungsaufgaben zulassen.

Die Mechanisierung in dieser Verfahrensgruppe ist so weit fortgeschritten, daß das Spanen überwiegend auf Werkzeugmaschinen mit hoher Produktivität vorgenommen wird. Manuelle Spanungsverfahren (wie Feilen, Meißeln, Schaben) kommen wegen ihrer geringen Produktivität nur noch für untergeordnete Bearbeitungsoperationen oder in Sonderfällen zur Anwendung (Einzel- oder Musterfertigung). Die Unterteilung der Verfahren des Spanens kann

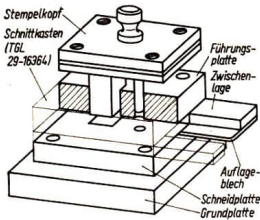


Bild 9.11. a Plattenführungsschnitt

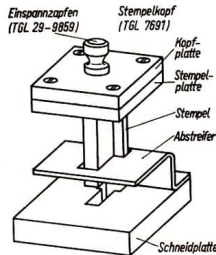


Bild 9.11. c Freischnitt

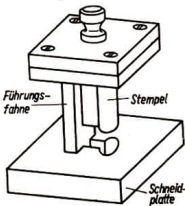


Bild 9.11. b Hinterführungsschnitt

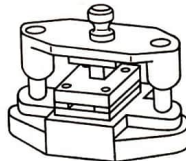


Bild 9.11. d Säulenführungsschnitt



nach der typischen Schneidenform des Schnittwerkzeuges erfolgen:

- a) Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide des Werkzeuges und
- b) Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide des Werkzeuges.

Eine weitere Unterscheidung ist nach ein- und mehrschneidigen Werkzeugen bei a, nach gebundenem und ungebundenem Schleifmittel bei b möglich.

Eine Charakteristik und Einteilung der Verfahren ist außerdem nach der Hauptbewegung des Werkzeuges bzw. Werkstückes auf der Werkzeugmaschine möglich:

- a) Verfahren mit geradliniger Hauptbewegung des Werkzeuges bzw. Werkstückes;
- b) Verfahren mit kreisförmiger Hauptbewegung des Werkzeuges bzw. Werkstückes.

Ein wirtschaftliches maschinelles Spanen wird durch folgende Einflußfaktoren bestimmt:

- a) durch das *Werkstück*: herzustellende Form, Werkstoff, geforderte Genauigkeit und Oberflächengüte (Rauhtiefe);
- b) durch die *Maschine*: Art und Größe, Bewegungsvorgänge (Drehzahlen, Vorschübe) u. a.;
- c) durch das *Werkzeug*: besonders Schneidengeometrie und Schneidenwerkstoff;
- d) durch den *Menschen* (Facharbeiter, Einrichter), seine Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeiten.

Die spanende Formgebung erfordert ein optimales Zusammenwirken aller dieser Faktoren, die wechselseitig das Ergebnis der Bearbeitung beeinflussen.

Die Grundzeit der Bearbeitung, die der Dauer des eigentlichen Formgebungsvorganges entspricht, ist durch die wirtschaftliche Schnittgeschwindigkeit bestimmt, die ihrerseits von den Eigenschaften des Werkzeuges und von der Konstruktion und Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine abhängt.

Die Entwicklung der Schneidenwerkstoffe und neue Erkenntnisse der Gestaltung der

Schneide (Schneidengeometrie) haben wesentlichen Einfluß auf die konstruktive Gestaltung der Werkzeugmaschinen genommen, um die Leistungsfähigkeit des Schneidenwerkstoffes voll auszunutzen.

Einen Überblick über die technologische Charakteristik wichtiger Spanungsverfahren gibt Bild 9.12., Seite 349, wobei das Zusammenwirken von Hauptbewegung und Vorschubbewegung besonders herausgestellt wurde.

Die vielseitigen Möglichkeiten der spanenden Herstellung z. B. von Gewinden in Gegenüberstellung zur ur- und umformen sowie abtragenden Bearbeitung zeigt Bild 9.13., Seite 350.

Das Prinzip des Stoßlappens (auch Ultraschallbearbeitung) besteht darin, daß die Schwingungen eines Werkzeuges mit Ultraschallfrequenz zwischen 18 kHz und 40 kHz für die Bearbeitung von Werkstoffen ausgenutzt werden. Die bei den genannten Frequenzen vorhandene Energiedichte (Schallstärke) beträgt etwa 1 W/cm^2 bis 10 W/cm^2 . Zwischen dem schwingenden Werkzeug und dem zu bearbeitenden Werkstück wird eine Schleifmittelaufschlammung zugeführt. Die harten Kristalle des Schleifmittels üben eine schleifende oder meißelnde Wirkung auf den Werkstoff aus. Das Arbeitsprinzip ist aus Bild 9.14.a, S. 351, ersichtlich. Vorteilhaft ist die Bearbeitung harter, spröder, elektrisch leitender und nichtleitender Werkstoffe (z. B. hochlegierte Stähle, Hartmetalle, Diamant, Keramik, Silizium, Germanium, Glas).

Abtragen durch Brenn- und Schmelzschnitten. Das Trennen von mittleren und dicken Blechen und massiven Teilen ab 30 mm Dicke ist wirtschaftlich durch Brenn- und Schmelzschnitverfahren möglich, indem der Stoffzusammenhalt durch Erwärmung bis zum Verbrennen bzw. Aufschmelzen des Metalls mit thermisch-chemischer Wirkung in Form einer schmalen Schnittfuge aufgehoben wird.

Zu diesen Verfahren gehören:

Das Sauerstoffbrennschneidverfahren:

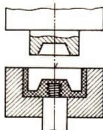
Prinzip: Gasschmelzschiessen mit Sauer-



Gewindeherstellung

Ur- und Umform-Verfahren

Urformende Verfahren

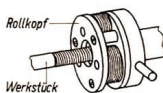


Gewindedorn wird nach dem
Prelfvorgang herausgeschraubt

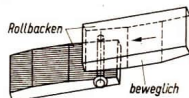
Gewinde pressen
in Plastmassen

Gewinde druckgießen
in Leicht- und Schwer-
metall-Legierungen

Umformende Verfahren

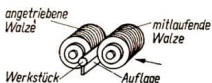


mit Rollkopf



Gewinde rollen

mit Backen

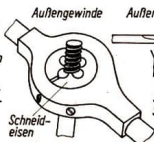


Gewinde walzen

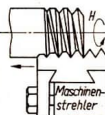
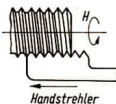


Gewinde formen (furchen)

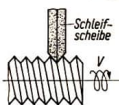
Spanende Verfahren



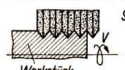
Gewindeschneiden von Hand



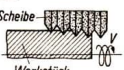
Gewinde strehlen



Einprofiliges Schleifen



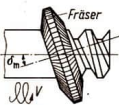
Einstechschleifen



Durchgangsschleifen

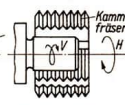
Mehrprofiliges Schleifen

Gewinde schleifen



δ_m = mittlerer
Steigungswinkel

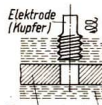
Langgewinde



$V \approx 1\frac{1}{2}$ Umdrehung

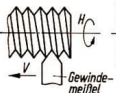
Kurzgewinde

Gewinde fräsen

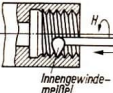


Werkstück (Hartmetall)
z.B.: M16; 12,5 mm tief
= 10 min

Elektroerosive
Gewindeherstellung

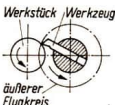


Außengewinde



Innengewinde

Gewindeschneiden mit Gewindemeißel



für Außen- und
Innengewinde



für Außengewinde

Gewinde wirbeln

Bild 9.13. Ur- und Umformverfahren sowie spanende Verfahren zur Gewindeherstellung

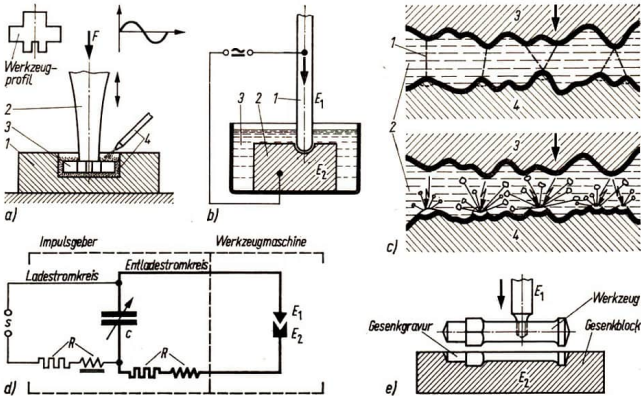


Bild 9.14. Abtragsverfahren — Prinzipdarstellung

- a) Stoßlappen: 1 Werkstück, 2 Schwingrüssel, 3 Werkzeug, 4 Schleifmittelführung
b) Elektrofunktenschnitt: 1 Werkzeuelektrode E_1 , 2 Werkzeuelektrode E_2 , 3 Dielektrikum
c) Funkenabtrag zwischen den Rauspitzen von Werkzeug und Werkstück: 1 Ionisierungskanäle, 2 Dielektrikum, 3 Werkzeug, 4 Werkstück

- d) Stromkreis einer Elektrofunktenschnittmaschine
e) Aufspannen einer Gesenkschneide

stoffüberschuß. Besonders für unlegierten oder niedriglegierten Stahl oder Guß geeignet. Hand- und Maschinenbrennschneiden.

Das Pulverbrennschneiden:

Prinzip: wie zuvor, mit einem unter Druck zusätzlich eingeblasenen eisenhaltigen Pulver, das durch Verbrennen die frei werdende Wärmemenge beträchtlich erhöht und besonders das Schneiden von Metallen mit schwermelzbaren Oxiden erleichtert. Besonders geeignet für NE-Metalle und hochlegierte Stähle.

Das Plasmaschmelzschnitten:

Prinzip: WIG-Schweißverfahren, bei welchem unter Einwirkung des elektrischen Lichtbogens auf den Gasstrom ein eingeschnürtes Lichtbogenplasma von hoher Energiedichte mit Temperaturen um 15000 °C erzeugt wird.

Verwendetes Gas: Gemisch aus Ar + H_2 oder Ar + N_2 , statt Ar auch He. Besonders zum Schneiden von NE-Metallen und hochlegierten Stählen, neuerdings auch für Baustähle unter 30 mm Dicke, geeignet.

Abtragen durch elektrothermische und elektrochemische Verfahren. Zu diesen modernen Verfahren gehören

- die elektroerosive Bearbeitung (Erodieren);
- die Elektronenstrahl-Bearbeitung (Eltrolieren);
- das Laser-Verfahren (elektrische Verfahren);
- die elektrolytische Bearbeitung oder Elysieren (elektrochemisches Verfahren).

Alle diese Verfahren sind dadurch charakterisiert, daß die Abtragung der Metalle nach vollständig anderen Prinzipien vorgenommen wird; gegenüber den herkömmlichen Verfahren zeichnen sie sich vor allem

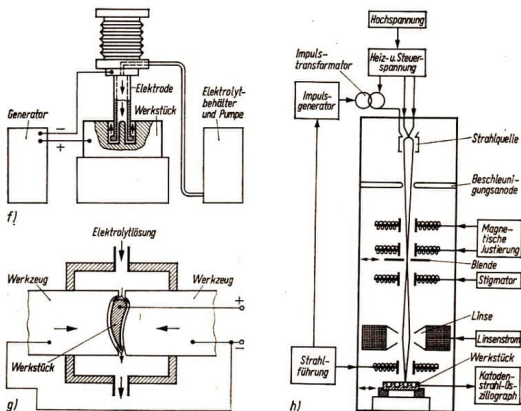


Bild 9.14. Abtragungsverfahren — Prinzipdarstellung

- f) Elysiersenken (EC-Senken)
g) Elysierglätten (EC-Glätten)
h) Elektronenstrahlbearbeitung

durch die Möglichkeit der Formgebung hochfester Werkstoffe (Metalle und Nichtmetalle) und der Feinbearbeitung mit engen Toleranzen aus. Diese Verfahren werden schon mit Erfolg in der Praxis angewandt. Grundsätzlich muß hervorgehoben werden, daß die Abtragungsmengen in der Zeiteinheit gegenwärtig noch geringer sind als bei der spanenden Bearbeitung, andererseits jedoch Bearbeitungen vorgenommen werden, die mit spanenden Verfahren nicht, sehr schwer oder nur mit großem Zeitaufwand durchzuführen sind.

Elektroerosive Bearbeitung. Von den Verfahren, die eine elektroerosive Metallabtragung vornehmen, hat sich besonders die *Elektrofunkenbearbeitung* in der Praxis eingeführt.

Zwischen einem als Katode geschalteten Werkzeug und dem als Anode geschalteten Werkstück werden kurzzeitige Funkenentladungen (Impulse) mit hoher Frequenz

ausgelöst. Die hohe Temperatur des Funkens sowie die entstehenden elektromagnetischen Kräfte und Druckwellen lösen Werkstoffteilchen vom Werkstück. Der gesamte Vorgang vollzieht sich in einer dielektrischen Flüssigkeit (Petroleum, Transformatorenöl) als Arbeitsmedium, in dem der Funke einen Ionisierungskanal bildet und das gleichzeitig die abgetragenen Werkstoffteilchen fortspült (Bild 9.14. b, c, d).

Mit diesem Verfahren können ebenfalls harte, jedoch nur elektrisch leitende Werkstoffe (Metalle) bearbeitet werden. Es werden heute bereits Abtragungsmengen von 2500 mm³/min erreicht. Da es zu keiner Berührung zwischen Werkzeug und Werkstück kommt, sind die formgebenden Werkzeuge meist weicher als der zu bearbeitende Werkstoff, sie unterliegen jedoch auch einem Abtragungsverschleiß (bis zu 20 %). Es können im Werkstück Durchbrüche und Gravuren mit beliebigem Querschnitt und beliebiger Form hergestellt werden (Bild 9.14. e).

Elektronenstrahlbearbeitung. Bei diesem Verfahren bewirkt ein Elektronenstrahl mit außerordentlich kurzzeitigen Impulsen und



hoher Energiedichte (bis über 10^9 W/cm^2) in einer evakuierten Kammer beim Auftreffen auf die Oberfläche des Werkstückes eine hohe Erwärmung, die zum Verdampfen des Werkstoffes führt. Die Wärmeausbreitung im Werkstück ist sehr gering. Diese Wirkung benutzt man, um mit einem gesteuerten Elektronenstrahl bzw. geführten Werkstück außerordentlich kleine Bohrungen, Durchbrüche und Schlitzte in harten Werkstoffen (Metalle und Nichtmetalle) bis zu einem Durchmesser bzw. einer Dicke von etwa $10 \mu\text{m}$ herzustellen. Man spricht deshalb auch vom Elektronenstrahl-Bohren oder -Fräsen.

Das Prinzip der Elektronenstrahlbearbeitung zeigt Bild 9.14.h.

Elysieren (ECM-Verfahren: elektrochemische Metallbearbeitung).

Das Abtragen des Werkstoffes erfolgt beim Elysieren durch eine Elektrolyse, d. h. durch einen elektrochemischen Auflösungsprozess in einem Elektrolyten. Werkstück und formgebende Werkzeuge (aus Kupfer, Messing) werden als Elektroden geschaltet, wobei letztere keinem Verschleiß unterworfen sind. Werkstück und Werkzeug haben (außer beim EC-Schleifen) keine unmittelbare Berührung. Zwischen beiden wird die Elektrolytlösung mit einem Elektrolytdruck über oder unter $0,4 \text{ MPa}$ (max. $1,0 \text{ MPa}$) hindurchgedrückt. Die Vorzüge dieser Bearbeitung, die besonders in den erreichbaren hohen Oberflächengüten zu sehen sind, gelten vor allem für

- die Bearbeitung besonders harter und zäher Werkstoffe,
- die Herausarbeitung komplizierter Konturen (Gesenke, Formen für die Plastteilherstellung),
- die Nachbearbeitung von wärmebehandelten und erosiv bearbeiteten Teilen.

Man unterscheidet heute: das EC-Bohren, -Drehen, -Entgraten, -Fräsen, -Glätten, -Polieren, -Senken, -Schleifen, -Trennen. Das Raumformen durch EC-Senken zeigt Bild 9.14.f, Bild 9.14.g gibt das Prinzip des EC-Glätzens zur Qualitätsverbesserung einer Schaufeloberfläche wieder.

Da die Abtragungsmenge in einem elektrolytischen Bad proportional der Stromstärke ist, wählt man zum Erzielen einer großen Abtragungsmenge und hoher Oberflächengüte sehr hohe Stromstärken. Es wird mit Spannungen zwischen 4 V und 12 V gearbeitet. Abtragungsmengen: beim EC-Schleifen bis zu $1000 \text{ mm}^3/\text{min}$ (Hartmetall), beim EC-Senken bis zu $30000 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei einer Stromstärke von 20000 A .

9.2.5. Fügen

9.2.5.1. Merkmale und Einteilung

Das Fügen zum Zusammenbringen (Verbinden) von zwei oder mehr Werkstücken bzw. Werkstückelementen geometrisch bestimmter fester Form ist ein wesentlicher Bestandteil der Montage von Einzelteilen zu Baugruppen bzw. zu einem Enderzeugnis in Gestalt von Maschinen, Geräten und Apparaten. Jedoch sind Fügeverfahren nicht nur Bestandteile der Endphase der Fertigung (Montage), sondern schon in der Rohaufbereitung werden Werkstückelemente vor einer umformenden oder spanenden Weiterbearbeitung gefügt.

Die Gruppen von Verfahren des Fügens, die vorrangig in der Metallverarbeitung genutzt werden, können auch unter dem Begriff *Verbinden* zusammengefaßt werden.

Zu diesen Verbindungsverfahren gehören:

- a) Verfahren des *An-* und *Einpressens*, bei denen die elastischen Eigenschaften der Fügeteile ausgenutzt werden und die Verbindung durch Reibkräfte aufrecht erhalten wird (z. B. Verschrauben, Keilen, Einpressen, Schrumpfen, Dehnen, Klammern).
- b) Fügen durch *Urformen*, wobei Werkstücke oder mehrere Fügeteile durch hinzugefügten formlosen Stoff verbunden werden (z. B. Ausgießen, Vergießen).
- c) Fügen durch *Umformen*, wobei Umformverfahren genutzt werden, um zwei oder mehr Teile formschlüssig zu verbinden (z. B. Sicken, Bördeln, Körnen, Rohreinwalzen, Falzen und besonders Nieten).
- d) *Stoffverbinden*, wobei der Werkstoff der Teile unter Anwendung von Wärme und bzw. oder Druck mit oder ohne Zusatz-



Fügen				
Fügen durch Zusammenlegen	Fügen durch Füllen	Fügen durch An- und Einpressen	Fügen durch Urformen	Fügen durch Stoffverbinden
 Gummi Stahl Auflegen	 Ballon Gasleitung von gas- oder dampf- förmigem Stoff Einfüllen	 Kell Rad Welle Verkeilen	 Plaste Gewindebuchse (Messing) Umpressen	 Stumpfschweißen
 Feder Welle Einlegen	 Getriebe von flüssigem Stoff Einlegen	 Hammer Welle hat Übermaß Einschlagen	 Messing Gießharz Stahl Umgießen	 Schweißen ohne Zusatzwerkstoff
 Ineinanderschieben	 Lagerschale Lagerkugeln Ring erwärmt Dehnen Welle unterkühlt von festen Körpern Einlegen	 Schrauben Nageln Welle unterkühlt Querpresen	 Beton Dübel Einschießen	 Vergießen Glas Löten
 Zugfeder Haken Einhängen	 Lagerschale (Sinterisen) Öl Tränken	 Nagel Nageln	 Spleißdorn Batterieklammer Klemmen	 GG Weißmetall Ausgießen
 Glühbirne Fassung Einrenken	 Schleifmittel Öl Einschlümmen	 Werkstück Magnetplatte Haftung durch magnetische Kräfte Klammern	 Eingalvanisieren	 Kitt Kitten

Bild 9.15. Verfahren zum Fügen — Prinzipdarstellung

werkstoff fest verbunden wird (z. B. Schweißen, Löten, Kleben, Walzplattieren).

Auch das Fügen durch Zusammenlegen sowie das Fügen durch Füllen umfassen Verfahren, die im Montageprozeß von Bedeutung sind. Bild 9.15. auf den Seiten 354 und 355 zeigt eine Übersicht über die Verfahren zum Fügen. Bestimmend für diese Einteilung ist die technologische Charakteristik der Grundverfahren und nicht der Gesichtspunkt, ob das Verfahren eine lösbare oder unlösbare bzw. kraft-, form- oder stoffschlüssige Verbindung ergibt. Die letztgenannte Unterteilung der Verbindungsverfahren ist natürlich für die konstruktive Gestaltung, für

die Montage und Demontage, für die Instandhaltung und Reparatur sowie damit verbundene Austauschbarkeit der Einzelteile eines bestimmten Erzeugnisses durchaus von großer Bedeutung.

Die Verbindungen durch An- und Einpressen, durch Urformen und Umformen können mittels vielfältiger Verfahren hergestellt werden und weisen eine große Variationsmöglichkeit im Fertigungsprozeß auf. Ihre technischen Grundprinzipien sind durch die Physik und die Grundlagen der Ur- und Umformung ausreichend erklärbar. Das Fügen durch Stoffverbinden (Schweißen, Löten, Kleben) unterliegt besonders stark dem technischen Fortschritt und seinen



Fügen					
U	m	f	Fügen durch		
			o	r	m e n
 <i>Körnen oder Kerben bei Röhren</i>	 <i>Fließpressen</i>	 <i>Aufweiten</i>	 <i>Einziehen</i>	 <i>Kerben oder Körnen bei Massivteilen</i>	 <i>Nähen</i>
 <i>Bördeln</i>	 <i>Rohreinwalzen</i>	 <i>Hohlknieten</i>	 <i>Einspreizen</i>	 <i>Anbiegen</i>	 <i>Binden</i>
 <i>Sicken</i>	 <i>Falzen</i>	 <i>Knickausbauchen</i>	 <i>Vernieten</i>	 <i>Verlappen</i>	usw. Einordnung von Verfahren, die sich in die schon genannten Gruppen nicht einordnen lassen
 <i>Ziehen</i>	 <i>Flechten-Weben</i>	 <i>Verdrillen</i>	 <i>Rundknieten</i>	 <i>Verdrehen</i>	
 <i>Ummanteln durch Ziehen</i>	 <i>Spleißen</i>	 <i>Verknoten</i>	 <i>Heften</i>	 <i>Ummwickeln</i>	

Entwicklungstendenzen, erfährt eine zunehmend breitere Anwendung und ist gegenüber herkömmlichen Fügeverfahren mit beachtlichen ökonomischen Vorteilen verbunden, die für die Rationalisierung der Fertigungsprozesse voll ausgeschöpft werden müssen. Deshalb wird diese Gruppe von Verfahren nachfolgend detailliert dargestellt.

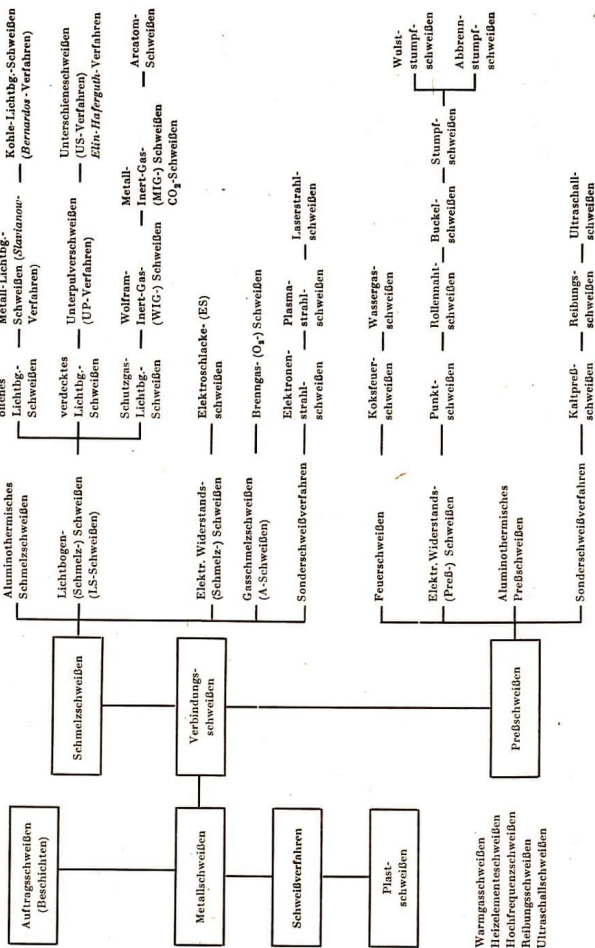
9.2.5.2. Charakteristische Merkmale wichtiger Schweißverfahren

Durch Schweißen werden Werkstücke aus gleichen metallischen oder thermoplastischen Werkstoffen unter Anwendung von Wärme und bzw. oder Druck miteinander verbunden.

In Abhängigkeit vom gewählten Verfahren und der Form der Schweißnaht ist es notwendig, Zusatzwerkstoffe zur Füllung der Schweißfuge zu verwenden, die in ihrer Zusammensetzung dem Grundwerkstoff entsprechen.

Die Verbindung der zu verschweißenden Teile kann im schmelzflüssigen oder im teigigen bzw. kalten Zustand des Werkstoffes unter Anwendung von Druck vorgenommen werden.

Die Schweißverfahren lassen sich deshalb nach *Schmelzschweißungen* und *Preßschweißungen* unterscheiden und diesen beiden Gruppen zuordnen (Übersicht 9.16., S. 356). Große Verbreitung in der Praxis haben die



Übersicht 9.16.: Einteilung der Schweißverfahren



Lichtbogenschmelzschweißverfahren, die elektrischen Widerstandspreßschweißverfahren und das Gasschmelzschweißverfahren gefunden.

Außer den spezifischen Erfordernissen der einzelnen Verfahren (Schweißgeräte, Wahl der richtigen Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes u. a.) macht sich in Abhängigkeit von der Dicke bzw. dem Querschnitt der zu verbindenden Schweißteile oftmals eine zusätzliche Vorbereitung der Kanten (Schweißfüge) erforderlich, die mitunter einen erheblichen Arbeitsaufwand erfordert, andererseits aber für eine innige Verbindung der Teile vorausgesetzt werden muß.

Daraus resultiert im Zusammenhang mit der Abschmelzleistung auch die Notwendigkeit, zur vollständigen Füllung der Schweißfüge oftmals mehrere Schweißräupen übereinanderzulegen (Mehrlagenschweißung). Nach dem Abkühlen des Schweißbades ist es weiterhin erforderlich, die sich bildende mehr oder weniger dicke Schlackenschicht über der Schweißnaht zu entfernen.

Schmelzschweißverfahren

Lichtbogenhandschweißverfahren (offener Lichtbogen). Beim heute fast ausschließlich angewandten *Slavianow*-Verfahren (Bild 9.17.a, S. 358) wird der Lichtbogen zwischen einer Metall-Elektrode und dem Werkstück gezogen. Der Lichtbogen schmilzt den Grundwerkstoff und gleichzeitig das Zusatzmaterial der Elektrode auf.

Da das Abschmelzen nackter (blanker) Elektroden einen ungehinderten Zutritt der atmosphärischen Luft zur Schweißnaht gestattet und deshalb nur geringe Gütewerte (Stickstoff- und Sauerstoffaufnahme) erreichbar sind, verwendet man heute vorwiegend umhüllte (Mantel-) Elektroden. Die Umhüllung besteht aus oxidischen Erzen, Basen, Flußmitteln, organischen Stoffen u. a., die zusammen mit der Metallelektrode abschmelzen, eine Schlacken- und Schutzgasschicht auf der Schweißnaht bilden und eine Stabilisierung des Lichtbogens gewährleisten.

Unterpulverschweißen (UP-Verfahren). Das UP-Schweißverfahren (Bild 9.17.e) ist dadurch charakterisiert, daß der zwischen dem Elektrodendraht und dem zu verbindenden Werkstück brennende Lichtbogen durch eine Pulverschicht verdeckt ist und damit das flüssige Schmelzgut geschützt wird.

Die Verwendung eines nackten Elektrodendrastes gestattet die kontinuierliche Zuführung des Zusatzwerkstoffes. Das Schweißpulver (Hauptbestandteile: MnO , CaO , MgO , Al_2O_3 , CaF_2 , SiO_2) dient dem atmosphärischen Schutz des Schmelzbades, der metallurgischen Beeinflussung des Schweißgutes und der Stabilisierung des

Lichtbogens. Infolge der Pulverabdeckung ergibt sich eine gute Ausnutzung der zugeführten Wärmeenergie.

Schutzgas-Lichtbogenschweißverfahren (SG-Verfahren) erfahren in zunehmendem Maße breitere Anwendung in der Industrie, wobei die Inertgasschweißungen und die CO_2 -Schweißung eine besondere Entwicklung zeigen. Eine erhöhte Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit bei diesen Verfahren verdrängt z. T. in bestimmten Anwendungsbereichen das Gasschmelz-, Lichtbogenhand- und UP-Schweißen.

Die SG-Verfahren sind dadurch charakterisiert, daß der Lichtbogen von einer Schutzgasatmosphäre umhüllt ist, die den Zusatzwerkstoff, die Lichtbogenzone und die Schweißfüge vor dem Zutritt der Luft schützt.

Beim *Arcatom-Schweißverfahren* (Bild 9.17.g) brennt der Lichtbogen zwischen zwei unverzehrten Wolfram-Elektroden. Das Schutzgas ist Wasserstoff H_2 , wobei es durch die Lichtbogentemperatur zu einem Dissoziationsprozeß kommt (molekularer H_2 wird in die atomare Form $2 H$ aufgespalten).

Das *Wolfram-Inert-Gas-Schweißverfahren* (WIG-Verfahren), bei dem der Lichtbogen zwischen einer Wolfram-Elektrode und dem Werkstück in einer Inert-Gas-Schutzhülle (Argon oder Helium) brennt, wird zur Verbindung vor allem von NE-Metallen und legierten Stählen, bevorzugt bei schwer schmelzbaren Werkstoffen, eingesetzt. Die Zuführung eines Zusatzdrahtes ist meist notwendig.

Das Prinzip des *Metall-Inert-Gas-Schweißens* (MIG-Verfahren, Bild 9.17.i) besteht darin, daß zwischen dem kontinuierlich zugeführten und abschmelzenden Zusatzdraht als Elektrode und dem Werkstück der Lichtbogen unter dem Schutzgas Argon Ar oder einem Gemisch $Ar + O_2$ gebildet wird.

Das *CO_2 -Schweißverfahren* arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie das MIG-Verfahren, wobei auch die gleichen Schweißgeräte angewendet werden. Das Schutzgas ist Kohlendioxid (CO_2), wobei in der Lichtbogenzone ein Dissoziationsprozeß vor sich geht. Die damit verbundenen chemischen Reaktionen können beim Schweißen legierter Stähle die Qualität der Schweißnaht beeinflussen. Deshalb schweißt man mit diesem Verfahren vorrangig Massenbaustähle (C-Stähle) (Bild 9.17.j).

Elektroschlacke-Schweißverfahren. ES-Verfahren dienen der Verbindungs- und Auftragschweißung bei dicken Blechen und kompakten Querschnitten aus Baustählen und Stahlguß (Maschinengestelle, Dickbleche im Kesselbau). Das Prinzip des Verfahrens besteht darin, daß eine oder mehrere Draht-Elektroden, die in eine Schlack-

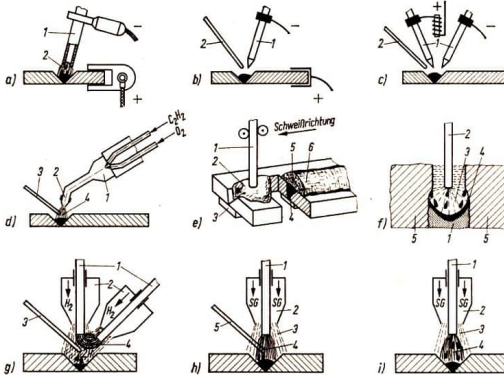


Bild 9.17. Schmelzschweißverfahren — Prinzipdarstellung

- a) Metall-Lichtbogenschweißen: 1 Metallelektrode (ummantelt), 2 Lichtbogen
- b) Kohle-Lichtbogenschweißen: 1 Kohlestab, 2 Zusatzstab
- c) wie b)
- d) Gasschweißen (autogenes Schweißen): 1 Mischkammer des Brenners, 2 Mischrohr mit Düse, 3 Zusatzstab, 4 Schweißflamme
- e) UP-Schweißen: 1 Blankdrahtelektrode, 2 Schweißpulver, 3 Kupferschiene, 4 Schweißnaht, 5 Schlackenschicht, 6 Pulverüberschuß

- f) Elektroschlacke-Schweißen (ES): 1 Schweißnaht, 2 Elektrode, 3 Schlackenbad, 4 Metallschmelze, 5 Werkstücke
- g) Arcatom-Schweißen: 1 Wolfram-Elektroden, 2 Düsen für Schutzgas H_2 , 3 Zusatzstab, 4 Lichtbogen in H_2 -Atmosphäre
- h) Wolfram-Inert-Gas-Schweißen: 1 Wolfram-Elektrode, 2 Düse, 3 Schutzgas Ar , 4 Lichtbogen, 5 Zusatzstab
- i) Metall-Inert-Gas- und CO_2 -Schweißen: 1 Metallelektrode (Zusatzmaterial), 2 Düse, 3 Schutzgas Ar bzw. CO_2 , 4 Lichtbogen

kenschicht eintauchen, nach der Zündung des Lichtbogens ein flüssiges Schlackenbad bilden, dessen Wärme auch den Grundwerkstoff aufschmilzt. Die Schweißung erfolgt in vertikaler Richtung, wobei wassergekühlte Formschuhe aus Cu das Schweißbad begrenzen und in Schweißrichtung mitgeführt werden, um ein Ausfließen des Schweißgutes vor dem Erstarren zu verhindern (Bild 9.17.f).

Gasschmelzschweißen. Das Gasschmelzschweißen gehört zu den herkömmlichen Verfahren, das durchaus noch eine breite Anwendung hat, jedoch zunehmend von Lichtbogenschweißverfahren verdrängt wird. Mit diesem Verfahren lassen sich fast alle Metalle schweißen. Beim Gasschweißen

wird die Wärmeenergie eines gezündeten Brenngas-Sauerstoff-Gemisches mit Temperaturen zwischen $2000^\circ C$ bis $3200^\circ C$ zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes und des Zusatzdrahtes genutzt. Als Brenngas dient überwiegend Äthin (Azetylen) C_2H_2 , außerdem Wasserstoff H_2 , Propan C_3H_8 (Bild 9.17.d).

Preßschweißverfahren:

Unter den Preßschweißverfahren haben gegenwärtig die elektrischen Widerstandsverfahren das größte Anwendungsfeld (Maschinenbau, Fahrzeugbau, Elektrotechnik, Flugzeugbau). Zum Widerstands-Preßschweißen gehören folgende Verfahren:

- Punktschweißen — Rollennahtschweißen —
- Buckelschweißen — Stumpfschweißen.



Das Widerstandsschweißen ist das unlösbare Verbinden von Metallen durch die Wärmewirkung des elektrischen Stromes unter Ausnutzung der im Schweißkreis vorhandenen elektrischen Widerstände mit Anwendung von Preß- und Stauchkräften.

Punktschweißen. Beim Punktschweißen wird der Schweißstrom über stabförmige Elektroden geführt, von denen eine beweglich angeordnet ist, um die erforderliche Preßkraft auf die überlappten Bleche ausüben zu können. Die Widerstandserwärmung erfolgt durch den Kontaktwiderstand der zusammengepreßten Bleche nach eingeleitetem Stromfluß. An den Berührungstellen der gekühlten Elektroden entsteht ein geschmolzener Kern, der die feste Verbindung bewirkt.

Rollennahtschweißen. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom Punktschweißen nur dadurch, daß man Elektrodenrollen verwendet, die außer der Stromzuführung und Preßwirkung das Werkstück kontinuierlich transportieren.

Buckelschweißen. Das Verfahren dient ebenfalls zum festen Verbinden von Blechen, wobei eines der zu verbindenden Teile eine umformende Vorbearbeitung erfahren muß, indem punktförmige Buckel oder Sicken in das Blech gedrückt werden. Beim Schweißen drücken ebene plattenförmige Elektroden die beiden Blechteile zusammen, wobei die Schweißverbindung an den punktförmigen Buckeln hergestellt wird, die während des Schweißprozesses zugedrückt werden.

Stumpfschweißen. Man unterscheidet zwei Varianten dieses Verfahrens:

- Wulststumpfschweißen und
- Abbrennstumpfschweißen.

Es können sowohl Drähte ab 0,2 mm Durchmesser und Werkstoffquerschnitte bis 90000 mm² stumpfgeschweißt werden.

Beim *Wulststumpfschweißen* (Preßstumpfschweißen) werden die zu verbindenden Werkstücke in zwei Spannbacken der Schweißmaschine gespannt, die die Funktion der Elektroden ausüben. Die Verbindungs-

flächen der Werkstücke müssen sauber und planparallel sein. Der Schweißprozeß läuft so ab, daß die beiden Verbindungsflächen fest aneinandergepreßt werden, nach Einschalten des Stromkreises infolge des Kontaktwiderstandes eine Erwärmung auf Schweißtemperatur von 850 °C bis 1250 °C erfolgt und durch den zusätzlichen Stauchdruck die feste Schweißverbindung über den gesamten Querschnitt entsteht. Mit diesem Verfahren können nur Querschnitte bis etwa 200 mm² verschweißt werden. Die Vorbereitung der Verbindungsflächen und die Beseitigung des Schweißwulstes sind recht arbeits- und kostenaufwendig.

Dagegen können mit dem *Abbrennstumpfschweißen* auch große Querschnitte verschweißt werden. Bei diesem Verfahren entfällt auch die Bearbeitung der Verbindungsflächen. Das Prinzip besteht darin, daß die gespannten Schweißteile anfänglich mit geringem Druck gegeneinander geführt werden, sich dabei einige Rauhsitzen der Oberfläche berühren und unter Stromfluß erwärmen. Der Vorgang des Annäherns und Entfernens der Verbindungsflächen wird so lange wiederholt, bis der Abbrennprozeß die gesamte Fläche erfaßt und diese unter starker Funkenbildung in schmelzflüssigen Zustand versetzt. Der Prozeß wird dann durch ein schlagartiges Stauchen mit endgültiger Verbindung der Stoßflächen abgeschlossen. Es bildet sich am Schweißstoß nur ein geringer Stauchgrat mit Schlackenschicht, der leicht zu entfernen ist. Bei diesem Verfahren werden höhere Festigkeitswerte, besonders für dynamische Beanspruchung der Schweißteile, erreicht als beim Wulststumpfschweißen.

Entwicklungstendenzen. Die beiden genannten Gruppen von Schweißverfahren erfahren ständig eine Erweiterung und Vervollkommenung der Grundverfahren. Neue Schweißverfahren, die in den letzten Jahren bekannt geworden sind, beruhen auf der erweiterten Ausnutzung physikalischer Erscheinungen für die Herstellung fester unlösbarer Stoffverbindungen.



Reibungsschweißen. Ausnutzung der entstehenden Reibungswärme beim Berühren der Verbindungsflächen von Schweißteilen mit kreisförmigem Querschnitt, die unter Druck und Bewegung (z. B. mit hoher Umdrehungsgeschwindigkeit) miteinander verbunden werden.

Es lassen sich gleichartige Metalle miteinander verschweißen. Als Maschinen können Dreh-, Bohr- und Fräsmaschinen eingesetzt werden. Technische Daten:

Drehzahlen – etwa 3000 min⁻¹,
Stauchdruck – 10 MPa bis 65 MPa,
Schweißzeit – 5 s bis 25 s.

Kaltpreß- und Ultraschallschweißen. Beim Kaltpreßschweißen erfolgt die Verbindung von Teilen aus NE-Metallen und deren Legierungen durch Druck unterhalb der Rekristallisationstemperatur, wobei ein Ineinandergreifen der Oberflächenschichten (Diffusion) stattfindet. Das Verfahren erfordert eine hohe Sauberkeit der sich berührenden Metallflächen.

Wird die Schweißstelle zusätzlich zu einem geringen Anpreßdruck mit Ultraschall-schwingungen in Druckrichtung überlagert, dann entsteht an den Schweißflächen eine Erwärmung durch Gleitreibung, die ein Verschweißen der Teile herbeiführt (Ultraschall-Schweißen).

Besonders hohe Energiedichten und damit verbundene große lokale Erwärmungen beim *Plasmastrahlschweißen* (Temperaturen von 10000 °C bis 12000 °C), *Elektronenstrahlschweißen* und *Laserstrahlschweißen* ermöglichen das Schweißen von hochlegierten Stählen und Metallen mit hohem Schmelzpunkt bzw. schwerschmelzbaren Oxidschichten bei hoher Güte der Schweißnaht. Diese Verfahren werden auch zum Schneidbrennen eingesetzt; sie werden zukünftig eine große Bedeutung in der Schweißtechnik haben.

Zum Stoffverbinden durch *Löten* siehe [4], [8].

Zum Stoffverbinden durch *Kleben* siehe [4], [9].

9.2.6. Beschichten

9.2.6.1. Merkmale und Einteilung

Das Beschichten ist eine Verfahrensgruppe, der technologische Grundverfahren zugeordnet werden, die durch das Aufbringen fest haftender Schichten auf die Oberfläche von Werkstücken charakterisiert sind. Sie umfaßt Verfahren, die bisher auch unter dem Begriff „Oberflächenbehandlung“ oder „äußeres Veredeln“ der Werkstücke bekannt sind. Der Zweck des Beschichtens von Werkstücken kann gerichtet sein auf

- a) den Korrosionsschutz,
- b) die Herstellung funktionsbedingter Oberflächeneigenschaften,
- c) die Schaffung eines bestimmten dekorativen Aussehens.

Viele Beschichtungsverfahren erfüllen mehrere oder alle vorgenannten Aufgaben (z. B. Vernickeln – Korrosionsschutz und dekorativer Effekt).

Der Schutz der Werkstücke gegen Korrosion durch geeignete Verfahren wirkt den volkswirtschaftlich hohen Verlusten durch Korrosion entgegen, erhöht die Lebensdauer der Erzeugnisse unter den spezifischen Betriebs- und Anwendungsbedingungen und ist deshalb eine vorrangige Aufgabe.

Die dieser Gruppe zugehörigen Verfahren können sowohl nach dem Zustand als auch nach der Art des aufzutragenden Stoffes untergliedert werden.

Einteilung nach dem Zustand:

- a) Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (z. B. Aufdampfen);
- b) Beschichten aus dem flüssigen oder pastenförmigen Zustand (z. B. Tauchüberzüge, Anstreichen, Auftragschweißen);
- c) Beschichten aus dem ionisierten Zustand (z. B. Galvanisieren);
- d) Beschichten aus dem festen (körnigen oder pulverigen) Zustand (z. B. Plattieren, Pulveraufspritzen).

Einteilung nach der Art des Beschichtungsstoffes:

- a) anorganische Schichten;
- b) organische Schichten (Übersichten 9.18. und 9.19.).

In die Oberflächenbehandlung eingeschlossen sind auch Verfahren der Vorbehandlung des Werkstoffes (z. B. Säuberung und Aufrauhung) als Voraussetzung für das Aufbringen fest haftender Schichten. Für die Auswahl und Anwendung der Verfahren sind der zu beschichtende Werkstoff, seine Oberflächeneigenschaften, seine Einsatz-



bedingungen und die auf ihn wirkenden Medien, die notwendige Dicke und Qualität der Schicht, der Zeit- und Materialaufwand ihrer Herstellung und nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu berücksichtigen. Die Oberflächen- und die Abriebfestigkeit der Schicht bestimmen außerdem ihre Lebensdauer und Wirksamkeit.

9.2.6.2. Charakteristische Merkmale ausgewählter Beschichtungsverfahren

Verfahren zur Herstellung metallischer Überzüge. Anteilmäßig nehmen in dieser Gruppe die *galvanischen* Verfahren zur Herstellung von Schichten auf Erzeugnissen der Metallverarbeitung den größten Platz ein. Das Überzugsmetall wird nach dem Prinzip der Elektrolyse aus einer Lösung oder Schmelze von Metallsalzen durch Gleichstrom abgeschieden. Die Spannungen liegen zwischen 1 V und 10 V, die Stromdichten 0,5 Adm^{-2} und 10 Adm^{-2} , Badtemperaturen 18 °C und 50 °C, bei Edelmetallen (Gold, Platin) betragen sie bis zu 90 °C.

Einwandfreie Metallschichten erfordern eine metallisch reine, fett- und zunderfreie Oberfläche, die durch verschiedene Verfahren der Vorbehandlung geschaffen werden muß (man unterscheidet mechanische und chemische Verfahren der Vorbehandlung): Schleifen, Bürsten, Polieren, Beizen und Brennen mit Säuren, Spülen, Neutralisieren, Dekapieren. Für die Nachbehandlung der galvanisierten Teile werden ebenfalls bestimmte Spülverfahren und Trocknungsverfahren eingesetzt.

In Abhängigkeit vom Grundwerkstoff kann das Überzugsmetall direkt oder mit bestimmten Zwischenschichten auf den Grundwerkstoff aufgebracht werden.

Die galvanischen Verfahren gestatten es, gleichmäßig dicke Schichten herzustellen, wobei die erforderliche Schichtdicke von der Stromdichte (Adm^{-2}) und Galvanisierzeit abhängt.

Die *Diffusionsverfahren* sind durch Abscheidung des Überzugsmetalls aus dem pulverigen oder gasförmigen Zustand unter erhöhten Temperaturen charakterisiert. Beim *Sherardisieren* (Zn) und *Alitieren* (Al) wird der Grundwerkstoff in Pulvern (Chloride) eingebettet, die bei Temperaturen von 400 °C (Zn) bzw. 900 °C (Al) das Überzugsmetall in den Grundwerkstoff diffundieren. Chromüberzüge (*Inkromieren*) werden bei einer Erwärmung des Grundwerkstoffes auf

1000 °C aus Chromchlorid (Gase oder Schmelzen) abgeschieden.

Eine vielseitige Anwendung bietet das *Metallspritzen*. Hierbei wird das Überzugsmetall in Draht- und Pulverform in einer Spritzpistole (elektrisch- oder gasbeheizt) zum Schmelzen gebracht und durch eine Düse auf den Grundwerkstoff aufgespritzt. Der Grundwerkstoff muß stark aufgeraut sein. Überzugsmetalle: Zn, Cu, Al, rostfreie Stähle. Durch Metallspritzen können auch nichtmetallische Werkstoffe beschichtet werden.

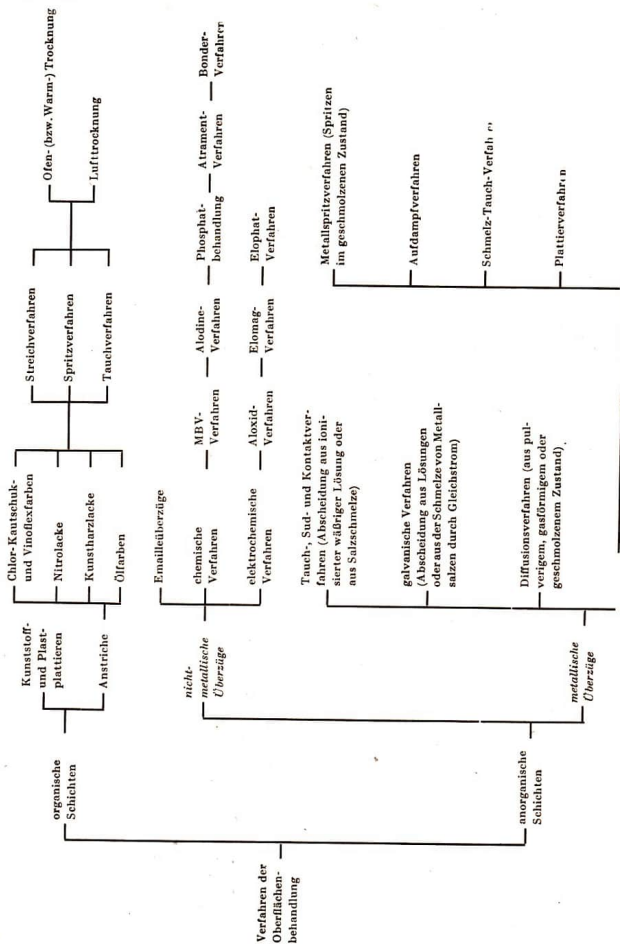
Eine herkömmliche Verfahrensgruppe bilden die *Schmelz-Tauch-Verfahren*, bei denen das Werkstück in ein Schmelzbad von Überzugsmetallen mit niedrigem Schmelzpunkt (besonders Zn, Sn, Pb) getaucht wird. Nach dem Beizen und Spülen werden z. B. beim Feuerverzinken (Naßverzinken) die Werkstücke in das geschmolzene Zinkbad (etwa 450 °C) getaucht. Die Tauchzeiten sind relativ kurz (bis zu 2 min).

Verfahren zur Herstellung nichtmetallischer Überzüge. Als nichtmetallische Überzüge gelten sowohl anorganische als auch organische Schichten.

Besonders für den Korrosionsschutz von Leichtmetallen gibt es Verfahren, die auf einer chemischen oder elektrochemischen Behandlung des Grundwerkstoffes beruhen. Als Beispiel sei das *Aloxid-Verfahren* dargestellt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren wird hier kein Überzugsmetall aufgebracht, sondern aus dem Grundwerkstoff wird eine Oxidschicht gebildet bzw. verdichtet, die einen guten Korrosionsschutz bietet.

Die anodische Oxydation ist eines der wichtigsten Verfahren zum Korrosionsschutz von Al und Al-Legierungen.

Verdünnte Schwefel-, Oxal- oder Chromsäure als Elektrolyte bilden unter Gleich- oder Wechselstrom an den Oberflächen der als Anode geschalteten Aluminiumteile eine Oxidschicht bis zu 40 μm Dicke. Diese Schicht hat eine große Härte (hohe mechanische Festigkeit), ist jedoch noch stark porös. Durch einen nachträglichen Quellvorgang in siedendem Wasser oder in Wasserdampf bzw. durch Tauchen in Paraffin oder Wasserglas werden diese Poren geschlossen. Außerdem ist es möglich, die poröse Schicht anzufärben und anschließend zu quellen, wo-



Übersicht 9.18.: Übersicht über die wichtigsten Beschichtungsverfahren



durch ein besonderer dekorativer Effekt erzielt wird. Die fertige Aloxidschicht ist ein ausgezeichneter Haftgrund für zusätzliche Farb- und Lacküberzüge (Übersicht 9.18.).

Farb- und Lackanstriche. Anstriche nehmen als Korrosionsschutzschichten, verbunden mit ihrer dekorativen Wirkung, nach wie vor einen breiten Raum in der Oberflächenbehandlung ein.

Die Schutzwirkung und Lebensdauer eines Anstrichs ist

von der Beschaffenheit und Vorbehandlung des Untergrundes;
von der Zusammensetzung des Anstrichstoffes und des Aufbaus des Anstriches;
von der Technologie des Anstriches;
von der Art und Dauer der Beanspruchung und der Wirkung der Medien der Umgebung abhängig.

Jeder Anstrichstoff setzt sich allgemein aus folgenden Hauptbestandteilen zusammen:
Bindemittel (z. B. trocknende Öle [Leinöl]; Nitrozellulose; Alkydharz; Chlorkautschuk, Vinoflex; Natur- und Kunstharze) –
Lösungsmittel (Testbenzin; Toluol; Xylol; Äthyl- und Butylazetat; Spiritus; Butanol; Terpentinöl) –
Pigmente (färbende Stoffe: Erdfarben, Mineralfarben, Teerfarben).

Die Vorbehandlung der Oberflächen des Grundwerkstoffes erfolgt weitgehend mit den schon genannten Verfahren, die auch bei den anderen Beschichtungsverfahren zur Anwendung kommen, und setzt ebenfalls metallisch reine, staub- und fettfreie Oberflächen voraus, um eine maximale Haftfähigkeit zu gewährleisten. Anstriche werden außerdem auch als zusätzlicher Schutz für bereits durch andere Verfahren beschichtete Oberflächen verwendet.

Art und Aufbau des Anstriches bedingen, daß dieser in mehreren Schichten aufgebracht wird, wobei Grundierungs-, Spachtel-, Schleif- und Trocknungsphasen im Wechsel aufeinanderfolgen.

Die Anstrichtechnik umfaßt das Streichen, Spritzen (Kalt- und Heißspritzen, elektrostatisches Spritzen), Tauchen. Während Grundierungen vorzugsweise durch Streichen erfolgen, hat sich das Spritzen für Deck- und Lackschichten bewährt. Das Tauchen soll möglichst in mechanisierten Anlagen vorgenommen werden, erfordert spezielle Tauchlacke und ist nicht bei allen Konstruktionsteilen möglich.

Nichtmetallische Überzüge

Emaillierüberzüge

Chemische Verfahren

Elektrochemische Verfahren

Metallische Überzüge

Elektrochemische Verfahren (galvanische Verfahren)

Diffusionsverfahren

Plattierverfahren

Schmelz-Tauch-Verfahren

Verfahren	Grundwerkstoff
Naßverfahren Puder- verfahren	St, GG, Al
MBV- Verfahren Alodine- Verfahren Phosphat- behandlung (Atrament- Verfahren, Bonder- Verfahren)	Al + Leg.
	Al + Leg.
	Stahl, Zn
Aloxid- Verfahren Elomag- Verfahren Elolphat- Verfahren	Al + Leg.
	Mg + Leg.
	Stahl
Verfahren	Grundwerkstoff
Vernickeln Verchromen Verkupfern Verzinken Verzinnen Vercadmen Vergolden	Stahl, Schwer- metalle Al (nur bedingt)
Sherardisieren (Zn) Alitieren (Al) Inkromieren (Cr)	Stahl
Verbund-Guß- verfahren Schrumpf- Verfahren Walz-Schweiß- Verfahren	Stahl, NE- Metalle
Feuer- verzinken Feuer- verzinnen Feuer- verbleien	Stahl

Übersicht 9.19.: Beschichtungsverfahren und Grundwerkstoffe



Die Trocknung der Anstrichschichten kann bei normalen Temperaturen (Lufttrocknung) oder bei erhöhten Temperaturen (Ofentrocknung) erfolgen. Da die Lufttrocknung sehr zeitaufwendig ist (Durchtrocknung: Ölfarben 24 bis 48 Stunden; Alkydharzfarben 16 bis 24 Stunden), trägt die Verkürzung der Trocknungsvorgänge durch Ofentrocknung erheblich zur Rationalisierung des Produktionsprozesses bei. Die *Einbrennlackierungen* bei Temperaturen zwischen 80 °C bis 240 °C und Trocknungszeiten < 2 Stunden verkürzen den Prozeß nicht nur erheblich, sondern weisen darüber hinaus eine erhöhte Widerstandsfähigkeit auf. Als modernes Verfahren hat sich auch die Infrarot-Trocknung bewährt.

9.2.7. Stoffeigenschaftändern

9.2.7.1. Merkmale und Einteilung

Eine Erhöhung der Verarbeitungs-, Beanspruchungs- und Gebrauchseigenschaften von metallischen Werkstoffen und aus ihnen geformten Werkstücken wird durch Verfahren der Wärmebehandlung erreicht, die auf die Änderung der Stoffeigenschaften durch Umlagern, Aussondern und Einbringen von Stoffteilchen ohne beabsichtigte Formänderung gerichtet sind.

Die Auswahl und Anwendung der Wärmebehandlung wird durch Art, Zusammensetzung, Aufbau und Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (siehe Werkstoffkunde), durch den beabsichtigten Effekt der Wärmebehandlung und z. T. auch durch die Form (Hauptgeometrie) der Werkstücke bestimmt. Ökonomische Anwendungskriterien sind vor allem die Stückzahl, die Dauer der technologischen Prozesse, der materielle und finanzielle Aufwand für die technischen Einrichtungen und Wärmebehandlungsmittel (z. B. Abkühlflüssigkeiten, Pulver, Pasten, Salze, Gase) sowie Energiearten (feste Brennstoffe, elektrische Energie, Gase).

Die Wärmebehandlung der Metalle läßt sich in folgende Gruppen von Verfahren unterteilen: Glühen, Härten, Vergüten, Altern und Aushärten.

Vom Werkstück her kann sich die Wärmebehandlung auf das ganze Werkstück bis zu seinem Kern oder nur auf seine Oberfläche mit bestimmter Eindringtiefe bzw. auf begrenzte Oberflächenelemente beziehen.

9.2.7.2. Charakteristische Merkmale ausgewählter Verfahren

Glühen. Die Glühverfahren können sowohl auf die Herstellung eines homogenen Gefügestandes nach erfolgter Bearbeitung, auf die Erreichung eines günstigen Gefügestandes für die nachfolgende Bearbeitung oder auf die teilweise bzw. vollständige Beseitigung eines Härtezustandes zur bevorzugten Ausbildung anderer Eigenschaften (z. B. größere Zähigkeit) orientiert sein.

Wichtige Glühverfahren:

Normalglühen	30 K bis 50 K oberhalb GOS im Fe-Fe ₃ C-Diagramm, danach Luftabkühlung (Stahl und Stahlguß)
Weichglühen	bei 720 °C (Stahl) 350 °C bis 400 °C (Al-Leg.)
Spannungsfreiglühen	500 °C bis 650 °C (Stahl) 450 °C bis 550 °C (Grauguß)
Anlassen	450 °C bis 650 °C (Baustähle) 250 °C bis 350 °C (Werkzeugstähle)

Nach dem Erhitzen auf richtige Glüh Temperatur muß diese eine Zeitlang gehalten werden, bis das Werkstück vollkommen durchgewärmt ist (Durchwärmdauer).

Anschließend ist eine langsame, gleichmäßige Abkühlung zu gewährleisten, um erneute Spannungen, Härteerscheinungen, Risse und Verwerfungen zu vermeiden. Abkühlen erfolgt in temperaturgesteuerten Öfen oder in sandgefüllten Kästen (Bild 9.20. a).

Härten. Das Härten von Metallen wird durchgeführt, um die Festigkeitswerte und besonders den Verschleißwiderstand der Werkstücke gegenüber ihrer natürlichen Härte zu steigern.

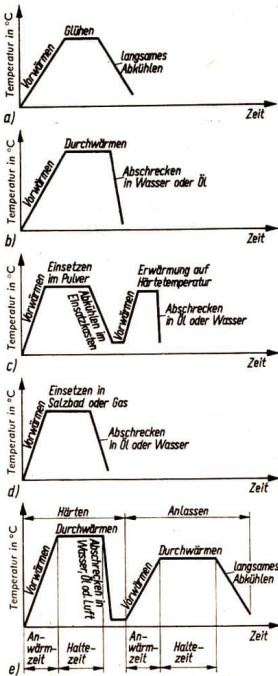
Unter Härten von Stahl- und Fe-C-Guß versteht man ein Abkühlen bzw. Abschrecken aus Temperaturbereichen > 720 °C (Gefügestand: γ -Mischkristalle bzw. γ -Mischkristalle + Zementit) zur Herstellung eines Härtegefüges (Martensit).

Härtetemperaturen:

unlegierte Stähle	etwa 880 °C bis 780 °C
hochlegierte Stähle	etwa 1000 °C bis 1310 °C

Das Härteverhalten von Fe-C-Legierungen hängt vom Kohlenstoffgehalt und vom Anteil anderer Legierungsmetalle (Ni, Cr, Mo, V, W) ab.

Nicht härthar Stahl (Baustahl): C-Gehalt 0,5 %.
Härthar Stahl (Werkzeugstahl): C-Gehalt 0,5 bis 1,7 %.
Bei Stählen mit niedrigem C-Gehalt lassen sich durch Aufkohlung ihrer Oberflächenschicht bestimmte Härteeffekte erzielen.



Übersicht 9.20.: Wärmebehandlungsverfahren im Temperatur-Zeit-Schaubild

- a) Glühen;
- b) Durchhärten;
- c) Einsatzhärten — Pulveraufkohlung;
- d) Einsatzhärten — Salzbad- und Gasaufkohlung;
- e) Vergüten

Man unterscheidet *Durchhärten*, *Teilhärten* und *Oberflächenhärteverfahren*.

Das *Durchhärten* direkt härtpbarer Stähle ist durch einen kurzen und einfachen technologischen Prozeß charakterisiert. Nach Erhitzung des Werkstoffes auf Härtetempera-

tur erfolgt ein schnelles Abkühlen in Wasser, Öl, Salzbadern oder Luft, je nach der erforderlichen Abschrecktemperatur und Abschreckwirkung. Die beim Durchhärten entstehenden Gefügewandlungen können zu einer Volumenveränderung und gewissen Maßabweichungen führen (Bild 9.20.b).

Die *Oberflächenhärtung* dient hauptsächlich der Verbesserung des Verschleißwiderstandes und der Druckfestigkeit der Oberfläche des Werkstückes, während ein zäher Kern mit guter Dehnungsfähigkeit erhalten bleibt.

Für die Oberflächenhärtung härtpbarer Stähle kommen die *Einhärteverfahren* zur Anwendung, für die Oberflächenhärtung kohlenstoffarmer Stähle die *Einsatzverfahren*.

Einhärteverfahren. Das *Flammen-* (oder *Brenn-*) *Härten* ist ein örtlich begrenztes Erwärmen der Oberflächenschicht mittels eines Brenners durch ein Gasgemisch (Stadtgas/Sauerstoff; Äthin/Sauerstoff) mit nachfolgend schneller Abschreckung durch eine Brause (Wasser). Der Brenner muß der zu erwärmenden Oberflächenform des Werkstückes angepaßt sein. Wirtschaftlichkeit ist auch bei Einzel- und Kleinserienfertigung gegeben.

Das *Induktionshärten* ist ein modernes Härteverfahren, bei dem eine rasche lokale Erwärmung aus dem Werkstück heraus durch induzierte Hochfrequenz- (HF-) oder Mittelfrequenz- (MF-) Ströme erfolgt. Die Stromzuführung erfolgt über *Heizschleifen* oder *-spulen* (auch Induktoren genannt), die der Form des Werkstückes bzw. der zu härtenden Oberfläche angepaßt sind. Nach Erreichen der Härtetemperatur wird meist mit Wasser im Bad oder mittels Brause abgeschreckt.

Dieses Verfahren zeichnet sich besonders durch große Härtegeschwindigkeit aus, hat also eine hohe Leistungsfähigkeit. Relativ hohe Kosten der Induktionshärtmaschine (einschließlich der formgebundenen Heizschleifen) setzen Serien- oder Massenfertigung voraus. Für beide vorgenannte Verfahren gelten noch folgende Vorteile:

- a) Möglichkeit der partiellen Härtung begrenzter Oberflächenbereiche;
- b) kurze Erwärmungszeiten;



c) Möglichkeit der Eingliederung in eine fließende Fertigung.

Das **Tauchhärten** ist eine Erwärmung der Werkstücke in Salzbadern bei Temperaturen $> 1000^\circ\text{C}$ ohne Aufkohlungs- und Einhärtetiefe ist von Badtemperatur und Tauchzeit abhängig. Abschrecken erfolgt wie beim Durchhärten. Erwärmung und Härtung erfolgen über die ganze Oberfläche.

Einsatzverfahren. Bei den **Aufkohlungsverfahren (Zementieren)** wird der oberflächenschicht kohlenstoffarmer Stähle bei einer bestimmten Temperatur Kohlenstoff zugeführt und nachfolgend gehärtet. Die Tiefe der Aufkohlung und damit der Härte ist von der Dauer der Behandlung abhängig. Die Aufkohlung kann aus dem festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand des Kohlungsmittels erfolgen.

Pulveraufkohlung — herkömmliches Verfahren. Kohlungspulver sind Holzkohle, Leder- oder Knochenkohle, meist aber schwefelreicher Koks. Das Werkstück wird in einem Kasten mit Kohlungsmittel umschüttet und fest eingeschlossen, dann über mehrere Stunden bei Temperaturen zwischen 850°C und 950°C geblüht. Einsatztiefe bis 3 mm. Nach dem Abkühlen wird meist eine Zwischenglühung vorgenommen, dann gehärtet (Bild 9.20.e).

Salzbadaufkohlung — Aufkohlung erfolgt in Salzbadern (z. B. Natriumcyanid) bei Temperaturen zwischen 820°C und 930°C . Die Aufkohlungszeit ist bei gleicher Aufkohlungstiefe geringer als beim Pulveraufkohlen, sie beträgt jedoch auch einige Stunden.

Das modernste Verfahren ist z. Z. die **Gasaufkohlung** aus gasförmigen und flüssigen Kohlungsmitteln (Stadtgas im Generator in ein Gemisch aus H_2 , CO und N_2 umgesetzt; Alkohol, Benzin, Petroleum in Gas umgesetzt). Die Aufkohlung erfolgt bei Temperaturen um 900°C , das Härten nach stufenweiser Abkühlung in Öl oder Wasser. Das Verfahren hat u. a. folgende Vorteile: kurze Aufkohlungszeiten, billige Aufkohlungsmittel, mögliche Anwendung in der fließenden Fertigung (Bild 9.20.d).

Durch **Nitrieren** in Ammoniakgas NH_3 (Gasnitrieren) oder in einem Salzbad aus $\text{NaCN} + \text{KCN}$ (Badnitrieren) unter Temperaturen zwischen 500°C bis 600°C dringt aktiver Stickstoff in die Randschicht der Werkstücke (Diffusion) und führt zu einer hohen Härte, verbunden mit einer ausgezeichneten Verschleißfestigkeit.

Gasnitrieren lassen sich vorzugsweise Stähle, die mit Al, V, Mo, Ni oder Cr legiert sind. Die Nitrierschicht hat im allgemeinen eine geringe Tiefe (0,3 mm bis 1,0 mm) in Abhängigkeit von der Nitrierzeit (10 bis 100 Stunden). Die Werkstücke müssen vor der Behandlung fertig bearbeitet sein. Die lange Dauer und die hohen Kosten des Verfahrens rechtfertigen eine Anwendung nur bei Werk-

stücken, die sich mit einem anderen Verfahren nicht oder schwer oberflächenhärten lassen.

Ein neueres Verfahren ist das **Badnitrieren**, das die Nitrierhärtung auch von unlegierten Baustählen und Grauguß gestattet. Der Vorteil des Verfahrens liegt vor allem in der Verkürzung der Nitrierzeit; in 1 bis 3 Stunden werden Nitriertiefen von 0,2 mm erreicht, die bereits einen ausreichenden Verschleißwiderstand aufweisen.

Ein weiteres modernes Verfahren dieser Gruppe ist das **Karbonitrieren** in Salzbadern oder Gasatmosphäre, das bei Temperaturen von 720°C bis 780°C eine gleichzeitige Kohlenstoff- und Stickstoffanreicherung in der oberflächenschicht herbeiführt.

Die Nitrierverfahren erfordern kein Abschrecken, da die Härte durch den diffundierten Stickstoff im Stahlgefüge der Oberfläche des Werkstückes zustande kommt.

Vergüten. Unter Vergüten versteht man ein Härten mit nachfolgendem Anlassen. Das Vergüten ist darauf gerichtet, im Werkstoff eine Festigkeitssteigerung mit hoher Zähigkeit herbeizuführen. Vorzugsweise verwendet man **Vergütungsstähle** mit einem C-Gehalt zwischen 0,20 Prozent bis 0,60 Prozent (legiert mit Cr, Ni, Mo oder unlegiert).

Altern und Aushärten. Alle Stähle unterliegen bei Raumtemperatur nach entsprechenden Wärmebehandlung oder Kaltumformung bestimmten Veränderungen der Eigenschaften, die erst nach längerer Zeit abklingen. Bei gehärteten Werkzeugstählen kommt es durch Alterung zu Umwandlungen im Härtegefüge (Martensit), die mit Volumenveränderungen verbunden sind und z. B. bei Meßzeugen und Wälzlagern eine Bedeutung haben. Um nachteilige Veränderungen an Werkstücken während des Einsatzes zu vermeiden, führt man im gegebenen Fall ein Anlassen zwischen 100°C bis 300°C je nach der Art des Stahles herbei.

Über die bei Baustählen auftretenden Alterserscheinungen siehe Seite 139.

Einige Al-Legierungen erfahren nach dem Glühen und Abschrecken durch Aushärtung eine beträchtliche Härtesteigerung, die nach etwa fünf bis acht Tagen ihren höchsten Wert (vgl. Bild 5.19., Seite 127) erreicht. Eine Lagerung bei höherer Temperatur kann den Aushärtungsprozeß erheblich verkürzen, erfordert jedoch die Beachtung besonderer Behandlungsvorschriften.

9.3. Weiterführende Literatur

- [1] Direktive des IX. Parteitages der SED zum Fünfjahrplan für die Entwicklung der Volkswirtschaft der DDR in den Jahren 1976–1980. Dietz Verlag, Berlin 1976.
- [2] Komplexprogramm für die weitere Vertiefung und Vervollkommen der Zusammenarbeit und Entwicklung der sozialistischen ökonomischen Integration der Mitgliedsländer des RGW. Dokumente RGW. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1971.
- [3] R. Retzke: Zur Ordnung fertigungstechnischer Untersuchungen. In: „die Technik“ 1964, Heft 1 und 2.
- [4] Meißner/Rothhaupt/Schenkel: Technologie des Maschinenbaus. Einführung in die Produktionstechnik. 8. Auflage. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.
- [5] Damerow/Leudert: Einführung in die Produktionstechnik. Band 2: Technologie der metallurgischen Industrie. 3. Auflage. VEB Verlag Technik, Berlin 1970.
- [6] Blume (Hrsg.): Einführung in die Fertigungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.
- [7] Autorenkollektiv: Taschenbuch Maschinenbau. VEB Verlag Technik, Berlin.
- [8] Beckert/Neumann: Grundlagen der Schweißtechnik, Schweißverfahren. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [9] Schwarz/Schlegel: Metallkleben und glasfaserverstärkte Kunststoffe. VEB Verlag Technik, Berlin 1975.
- [10] W. Zimmer: Korrosion der Metalle. Polytechnische Bibliothek. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964.
- [11] Hesse/Zapf: Kleines Lexikon der fertigungstechnischen Automatisierung. Reihe Automatisierungstechnik, Band 155. VEB Verlag Technik, Berlin 1974.
- [12] Fertigungsverfahren im Maschinenbau. Systematik und Begriffe. 6 Heft FZW 21 bis 26 (1974/1975). Herausgeber: Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus, Karl-Marx-Stadt

10. Standardisierung

verfaßt von Prof. Dr. habil. H. Messing†
und Prof. Dr. sc. H. J. Aust

Die Standardisierung ist aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Die zunehmende Vereinheitlichung ist ein Erfordernis der Entwicklung der gesellschaftlichen Produktion. Die Standardisierung hat für die weitere Vervollkommenung der materiell-technischen Basis des Sozialismus große technische, ökonomische und politische Bedeutung. So ist die Standardisierung ein wichtiger Faktor für die Steigerung der Arbeitsproduktivität und des Nationaleinkommens. Deshalb widmeten und widmen die Sozialistische Einheitspartei Deutschlands und die Regierung der Deutschen Demokratischen Republik der Standardisierung große Aufmerksamkeit.

So umschließt die Aufgabenstellung des IX. Parteitages der SED insbesondere auch das noch wirkungsvollere Durchsetzen der sozialistischen Intensivierung der gesellschaftlichen Produktion als Hauptweg der wirtschaftlichen Entwicklung in der Deutschen Demokratischen Republik (siehe auch [1]). Durch Ausschöpfen sämtlicher gegebenen Möglichkeiten des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und noch vorhandener Reserven soll die Erhöhung der Effektivität der Produktion bewirkt werden. Sozialistische Intensivierung bezieht sich sowohl auf Maßnahmen der sozialistischen Rationalisierung und Rekonstruktion der vorhandenen Betriebe als auch auf die begründete Schaffung neuerer Produktionskapazitäten. Sie wird zum Nutzen des Menschen durchgeführt und ist daher eng mit der Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen der Werktätigen verbunden (siehe auch [2]). Die vorstehend

genannte Zielsetzung ist für die weitere Entwicklung der Standardisierung in der DDR von grundlegender Bedeutung, weil die Standardisierung als Bestandteil der sozialistischen Intensivierung und als hervorragendes Mittel zu ihrer Durchsetzung angesehen werden muß. Das erforderliche Wirksamwerden der Standardisierung wird demgemäß zwangsläufig vom Entwicklungsstand unserer sozialistischen Gesellschaft bestimmt.

Durch die folgenden Ausführungen soll der Leser nicht nur mit den wichtigsten Grundlagen der Standardisierung vertraut gemacht, sondern auch für die Mitarbeit bei der Durchsetzung der Standardisierung in seinem Wirkungsbereich gewonnen werden. Das ist deshalb erforderlich, weil die Standardisierung keine Ressortarbeit von bestimmten Dienststellen oder von Konstrukteuren, Technologen und ausschließlich auf dem Gebiet der Standardisierung Tätigen sein darf.

Die Standardisierung ist vielmehr eine wichtige gesellschaftliche Aufgabe, die nur durch die aktive Mitwirkung aller Werktätigen erfüllt werden kann. Der Grundstein muß dafür bereits in den polytechnischen Oberschulen gelegt werden. Aus diesem Grund hat die Standardisierung Eingang in die Lehrpläne der polytechnischen Oberschule gefunden.

10.1. Begriffe und Arten von Standards

Zunächst ist erforderlich, den Inhalt der Begriffe *Standard*, *Standardisierung* und *Typung* sowie anderer für die folgenden

Ausführungen wichtiger Begriffe, beispielsweise Aufwandsnormung, zu bestimmen, damit das Verständnis der nachfolgenden Abschnitte erleichtert wird.

Ein Standard ist ein *Vereinheitlichungsergebnis*, das die gleiche Lösung einer sich wiederholenden Aufgabe enthält. Vereinheitlichungsergebnisse werden auf unterschiedlichen Gebieten des gesellschaftlichen Lebens angewendet. Zu ihnen gehören z. B. sittliche Normen und Rechtsnormen. Für die sozialistische Volkswirtschaft sind insbesondere zwei Gruppen von Vereinheitlichungsergebnissen bedeutsam. Die erste Gruppe wird mit *Standards* bezeichnet und hat Beschaffenheiten, Verfahren und Verständigungsmittel zum Gegenstand. Die zweite Gruppe bezieht sich auf den Aufwand an lebendiger und vergegenständlichter Arbeit (z. B. Arbeitsnormen, Materialverbrauchsnormen) und heißt deshalb *Aufwandsnormen*. Leider kommt es manchmal noch zu Begriffsverwirrungen, weil früher Standards mit *technischen Normen* bezeichnet wurden und Aufwandsnormen mit *technisch begründet* als Ausdruck von deren hoher Qualität, beispielsweise als technisch begründete Arbeitsnorm (TAN), benannt werden. Aus Zweckmäßigkeitsgründen wird deshalb grundsätzlich die erste Gruppe der Vereinheitlichungsergebnisse mit *Standards* bezeichnet, während der Wortstamm *Norm* den Vereinheitlichungsergebnissen der zweiten Gruppe überlassen bleibt.

Um zu den Begriffsbestimmungen von *Standard* und *Standardisierung* zu gelangen, ist es zunächst erforderlich, auf die wichtigsten Arten von Standards einzugehen, siehe auch [3].

Arten von Standards bei Gliederung nach dem Inhalt sind:

1. Beschaffenheitsstandards: Sie enthalten Abmessungen, Masse- und Stoffangaben sowie Oberflächenbeschaffenheiten von Arbeitsgegenständen, Arbeitsmitteln und Erzeugnissen.
2. Verfahrensstandards: Sie enthalten Herstellungsverfahren, Prüfverfahren und

andere Verfahren (u. a. Berechnungsverfahren und Lagerungsvorschriften).

3. Verständigungsstandards: Sie enthalten Begriffsbezeichnungen und Begriffsinhalte, Einheiten und Zeichen, Symbole u. a.

Vielfach sind in einem Standardblatt als dem Organisationsmittel der Standardisierung aus Zweckmäßigkeitsgründen gleichzeitig Beschaffenheitsstandards, Verfahrensstandards und Verständigungsstandards enthalten.

Arten von Standards bei Gliederung nach dem Geltungsbereich sind:

1. Werkstandards: Sie gelten für ein Kombinat, einen VEB, ein VEG, eine LPG, eine PGH oder eine Institution und werden vom jeweiligen Leiter herausgegeben (Bild 10.1.).
2. Fachbereichstandards: Sie gelten innerhalb der DDR für das spezifische Produktionsortiment, das im Fachbereich gefertigt wird, und werden vom Generaldirektor der für die entsprechende Erzeugnisgruppe zuständigen VVB bzw. des betreffenden Kombinats herausgegeben. Das Symbol ist TGL (Bild 10.4.).
3. DDR-Standards: Sie gelten für den Bereich der Deutschen Demokratischen Republik und werden vom Leiter des Amtes für Standardisierung herausgegeben. Das Symbol ist TGL (Bild 10.2.).
4. Internationale Standards: Sie gelten für mehrere Länder. Die wichtigsten sind die RGW-Standards, die von der Ständigen Kommission für Standardisierung im Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe bestätigt werden. Sie gelten verbindlich für die RGW-Länder, die diesem Standard zugestimmt haben. Sie werden in das nationale Standardisierungswerk ohne zusätzlichen Beschluß übernommen (in der DDR mit Symbol TGL plus Sinnbild RGW mit Registriernummer des RGW-Standards entsprechend Bild 10.3.).

Weitere internationale Standards sind

ISO-Empfehlungen (z. B. ISO-R3 Vorzugszahlen), die aber nur empfehlenden Charakter haben.

Die richtige Definition von *Standardisierung* und *Standard* setzt weiterhin voraus, daß der Zusammenhang mit dem Entwicklungsstand der Produktivkräfte und den jeweils herrschenden Produktionsverhältnissen beachtet wird. Dadurch werden das Ziel und die sich aus den Produktionsverhältnissen ergebenden Vor- bzw. Nachteile für die Standardisierung, die Aufgaben der Standardisierung sowie die bei der Standardisierung geltenden Grundsätze und anzuwendenden Methoden bestimmt.

Das Ziel der Standardisierung im Sozialismus besteht darin, als Mittel zur Verwirklichung der Erfordernisse des ökonomischen Grundgesetzes des Sozialismus beizutragen. Bei der weiteren Gestaltung der entwickelten sozialistischen Gesellschaft hilft die Standardisierung, die Hauptaufgabe – die weitere Erhöhung des materiellen und kulturellen Lebensniveaus des Volkes auf der Grundlage eines hohen Entwicklungstempos der sozialistischen Produktion, der Erhöhung der Effektivität des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und des Wachstums der Arbeitsproduktivität – zu erfüllen.

In der sozialistischen Produktionsweise hat die Standardisierung eine neue Qualität erlangt. Die dafür maßgebenden Voraussetzungen sind u. a.: Die Standardisierung wird planmäßig als wissenschaftlich-technische Leistung bei der Entwicklung und Vervollkommen von Erzeugnissen und Verfahren durchgeführt; sie ist Sache des sozialistischen Staates und aller Werktätigen; Standards sind grundsätzlich verbindlich.

Die Inhalte der Begriffe *Standardisierung* und *Standard* können unter den Bedingungen der sozialistischen Produktionsweise wie folgt gekennzeichnet werden:

Standardisierung als ein wesentlicher Bestandteil der sozialistischen Intensivierung ist die Gesamtheit der in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit in allen Phasen des Reproduktionsprozesses (von der Planung und

Leitung über die Produktion bis zum Absatz) und in allen Wirtschaftsbereichen und Wirtschaftszweigen durchgeführten Maßnahmen für das planmäßige Ausarbeiten, Durchsetzen, Kontrollieren und Überarbeiten von Standards. Die Standardisierung hat das Ziel, zur Verwirklichung der Erfordernisse des ökonomischen Grundgesetzes des Sozialismus beizutragen. Sie hilft, die Hauptaufgabe in der Einheit von Wirtschafts- und Sozialpolitik zu erfüllen.

Ein *Standard* in der sozialistischen Volkswirtschaft ist die einheitlich anzuwendende, verbindliche Bestlösung einer sich wiederholenden Aufgabe in bezug auf Beschaffenheiten von Arbeitsgegenständen, Arbeitsmitteln und Erzeugnissen, auf Herstellungs-, Prüf-, Konstruktions-, Berechnungs- und Lagerungsverfahren und andere Verfahren sowie auf Verständigungsmittel in allen Geltungsbereichen. Ein Standard wird in allen Phasen des Reproduktionsprozesses und in allen Wirtschaftsbereichen und Wirtschaftszweigen nach den für die Standardisierung geltenden Grundsätzen und mit wissenschaftlichen Methoden über die Entwicklungsstufen vom Standardvorschlag bis zum endgültigen bzw. überarbeiteten Standard planmäßig als Grundlagenstandard oder Fachstandard ausgearbeitet und angewendet.

Der Standard entsteht in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit aller Beteiligten unter Berücksichtigung der Erfahrungen der Neuerer. Im *Standardblatt* werden die Standards veröffentlicht.

Der Klarstellung bedarf auch der Begriffsinhalt von *Typung*, weil dieser Begriff fälschlich oft gleichberechtigt neben Standardisierung verwendet wird: Typung ist ein Teilgebiet der Standardisierung und hat Festlegungen der Art und Größe von Arbeitsgegenständen, Arbeitsmitteln und Erzeugnissen zum Gegenstand.

Die Begriffsbestimmung von *wissenschaftlich begründete Aufwandsnorm* lautet: Eine wissenschaftlich begründete Aufwandsnorm (Arbeitsnorm als Arbeitszeitznorm oder Besetzungsnorm, Materialverbrauchsnorm und Verschleißnorm) legt den erforderlichen Aufwand an lebendiger oder vergegenständlichter Arbeit je Erzeugniseinheit bzw. Leistungseinheit oder je Arbeitsstätte bei Gewährleistung der geplanten optimalen Arbeitsergebnisse (Güte, Menge, Materialverbrauch u. a.) unter den jeweils bestmöglichen technischen, technologischen, arbeitsorganisa-

DK



Standard  LEUNA-WERKE "Walfischgericht"		
---	--	---

Bild 10.1. Werkstandard

DK 678.4.032:543.064

DDR-Standard

Oktober 1963



<div>Deutsche Demokratische Republik</div> <div></div>	<div>Prüfung von Elastomeren</div> <div>Bestimmung des Gehaltes an Verunreinigungen in Rohkautschuk</div>	<div> 20 008</div> <div>Gruppe 490</div>
<div>Испытание эластомеров</div> <div>Определения содержания загрязнений в натуральном каучуке</div>	<div>Testing of Elastomers</div> <div>Determination of the Contaminations Contained in Natural Rubber</div>	

Bild 10.2. DDR-Standard

DK 669.13/.15:545:669.111.2

DDR-Standard

Juli 1961


Deutsche Demokratische Republik	Chemische Analyse von Eisen und Stahl Bestimmung des ungebundenen Kohlenstoffs (Graphit und Temperkohle)	☆  11524 Gruppe 270
--	---	---

Bild 10.3. DDR-Standard auf der Grundlage der Empfehlungen des RGW für Standardisierung

KB 838.312

Fachbereich-Standard

April 1962

Fachbereich FSB Bauwesen	<i>Schlagbohrmaschinen Arbeitsverfahren</i>	 118-0399
---------------------------------------	--	--

Bild 10.4. Fachbereichstandard

torischen, arbeitspsychologischen u. a. Bedingungen fest. Sie wird nach den für die Aufwandsnormung geltenden Grundsätzen (u. a. Neue Technik – Neue Normen) auf Grund der Ergebnisse einer Studie (Arbeits-, Materialverbrauchs- oder Verschleißstudie) gemeinsam mit den Werkstätten planmäßig ausgearbeitet und angewendet.

Der Begriff *Aufwandsnormung* hat folgenden Inhalt:

Aufwandsnormung ist die Gesamtheit aller Maßnahmen für das Ausarbeiten, Einführen, Kontrollieren und Überarbeiten von Aufwandsnormen mit dem Ziel, als Mittel zur Aufdeckung von Reserven und Anwendung des optimalen Arbeitsverfahrens, zur Senkung des Arbeitsaufwandes, zur Planung und zur Bewertung der Arbeitsleistung zu dienen.

10.2. Aufgaben der Standardisierung

Konzentration und Spezialisierung. Die Konzentration der Produktion und die Spezialisierung der Betriebe auf wenige Erzeugnisse oder Produktionsvorgänge setzen weitgehende Standardisierungsmaßnahmen voraus. Die Standardisierung schafft den erforderlichen großen Bedarf je vereinheitlichten Erzeugnistyp und ermöglicht dadurch die Herstellung größerer Erzeugnismengen, den rationellen Einsatz der lebendigen und vergegenständlichten Arbeit sowie die größtmögliche Ausnutzung der modernen Technik. Der Konzentration und der Spezialisierung dienen vor allem die Beschaffenheitsstandards für Erzeugnisse und die Standards für Herstellungsverfahren. Die Beschaffenheitsstandards für Erzeugnisse helfen, den sogenannten *Typenpartikularismus* zu beseitigen, indem sie die erforderliche Vielfalt der Erzeugnisse festlegen. Sie schaffen damit den notwendigen großen Bedarf je Erzeugnistyp, der Voraussetzung für die Konzentration und Spezialisierung ist. Durch sie wird aber gleichzeitig die Bestlösung hinsichtlich der Qualitätsforderungen entsprechend dem Verwendungszweck des Erzeugnisses festgelegt. Im Maschinenbau der DDR konnte z. B. von 1972 bis 1975 die Anzahl der zentralen Fertigungen verdoppelt werden, weil optimale Sortimente von Baugruppen und Einzelteilen in Standards festgelegt wurden. Das Anwenden von Standards für Herstellungs-

verfahren gewährleistet in hervorragender Weise den rationellen Einsatz der lebendigen und vergegenständlichten Arbeit und die größtmögliche Ausnutzung der modernen Technik in den spezialisierten Betrieben, weil sie die Bestlösung für das Herstellungsverfahren unter den jeweiligen Produktionsbedingungen enthalten.

Mechanisierung und Automatisierung. Indem die Standardisierung weitgehend die Konzentration der Produktion und die Spezialisierung der Betriebe ermöglicht, dient sie gleichzeitig der Mechanisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse. Die konzentrierte Produktion großer Mengen je Erzeugniseinheit in spezialisierten Betrieben ist eine wesentliche Voraussetzung für die Mechanisierung und Automatisierung. Die Standardisierung ist darüber hinaus für die Mechanisierung und Automatisierung deshalb bedeutungsvoll, weil mit ihrer Hilfe die Beschaffenheiten der Arbeitsgegenstände, der Arbeitsmittel, einschließlich der Prüf- und Regelgeräte, der Erzeugnisse sowie die Herstellungs- und Prüfverfahren und Einzelheiten über die technische Sicherheit und den Gesundheitsschutz vereinheitlicht werden. Für die automatisierte Produktion ist beispielsweise wesentlich, daß durch standardisierte Regel- und Prüfgeräte und durch standardisierte Prüfverfahren ein kontrollierter, gleichmäßig guter Ablauf des Produktionsprozesses gewährleistet wird. Die Standardisierung der Beschaffenheit der Arbeitsmittel ist Voraussetzung für die kontinuierliche, störungsfreie und durch nur geringfügige Reparaturzeiten unterbrochene Produktion (bloßes Auswechseln der schadhafte Teile).

Der Wirkung der Standardisierung auf die Konzentration und Spezialisierung, auf die Mechanisierung und Automatisierung in Produktion, Verwaltung und Handel, im Verkehrswesen und in allen anderen Dienstleistungsbetrieben kommt deshalb große Bedeutung zu, weil sie dadurch beträchtlichen Einfluß auf die Steigerung der Ar-

beitsproduktivität und die Erhöhung des Nationaleinkommens gewinnt.

Internationale Arbeitsteilung. Die Standardisierung liefert wichtige Grundlagen für die internationale Arbeitsteilung zwischen den sozialistischen Ländern, vor allem durch verbindliche RGW-Standards und RGW-Empfehlungen (in DDR-Standards mit TGL und Sternchen gekennzeichnet) für die Beschaffenheit der Arbeitsgegenstände, der Arbeitsmittel und der Erzeugnisse, der Prüfverfahren sowie für Verständigungsmittel. Beispiele sind Vereinheitlichungen auf den Gebieten der Stahlmarken, des Walzstahls, der Roh- und Hilfsstoffe für die Metallurgie, der Passungen und Toleranzen sowie der Projektierungs- und Berechnungsgrundlagen im Bauwesen. Auf der Grundlage der RGW-Standards und -Empfehlungen können dann die Maßnahmen für die Spezialisierung der Produktion zwischen den sozialistischen Ländern getroffen werden. Für die zwischenstaatliche Konzentration, Spezialisierung und Kooperation ist die internationale Abstimmung der nationalen Standards der sozialistischen Länder (z. B. UdSSR – GOST, Volksrepublik Polen – PN, ČSSR – ČSN, Sozialistische Republik Rumänien – STAS, Ungarische Volksrepublik – MSZ, Deutsche Demokratische Republik – TGL) für solche Beschaffenheiten, Verfahren und Verständigungsmittel notwendig, die für die internationale Zusammenarbeit wichtig sind. Besonders bedeutsam für die Vertiefung der internationalen Arbeitsteilung, Spezialisierung und Kooperation, für die Erweiterung des gegenseitig vorteilhaften Warenaustausches sowie für die gemeinsame Lösung wissenschaftlich-technischer Probleme ist die Vereinheitlichung der staatlichen Standards der UdSSR und der DDR auf der Grundlage eines Regierungsabkommens von 1973. Bis Ende 1975 wurden bereits über 400 Standards beider Staaten vereinheitlicht.

Planung der Gebrauchswerte. Im Sozialismus hat die Standardisierung eine Aufgabe

zu erfüllen, die sie in kapitalistischen Ländern nicht haben kann. Die Planung der materiellen Produktion darf sich nicht in der Planung von Art, Umfang und Wert der Arbeitsgegenstände, Arbeitsmittel und Erzeugnisse erschöpfen. Aus dem ökonomischen Grundgesetz des Sozialismus kann abgeleitet werden, daß sie sich auch auf die Beschaffenheit der materiellen Güter und die bei ihrer Herstellung und Prüfung anzuwendenden Verfahren erstrecken muß. Genauso, wie Arbeitszeitnormen, Besetzungsnormen und Materialverbrauchsnormen Grundlagen für die Mengen- und Wertplanung sind, sind die Beschaffenheitsstandards und die Standards der Herstellungs- und Prüfverfahren Grundlagen für die Planung der Gebrauchswerte. Durch die Planung der Gebrauchswerte soll verhindert werden, daß die wesentlichen Beschaffenheiten der materiellen Güter durch zufällige Einwirkungen beeinflusst werden können. Es muß erreicht werden, daß auch die Gebrauchseigenschaften geplant werden, und zwar bereits vor Beginn des Produktionsprozesses. Klarheit muß darüber bestehen, in welchen Sorten mit welchen Beschaffenheitsmerkmalen und wie die materiellen Güter hergestellt und geprüft werden sollen. Beschaffenheitsstandards und Verfahrensstandards sind Mittel für diese erforderliche Planung der Gebrauchswerte.

Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung. Die inner- und überbetrieblichen Organe der Qualitätssicherung, besonders die Technische Kontrollorganisation (TKO) in den volkseigenen Betrieben und die Prüfdienststellen des Amtes für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW), üben ihre Tätigkeit in beträchtlichem Umfang auf der Grundlage von Standards aus.

Der Qualitätssicherung und -verbesserung dienen vor allem die Beschaffenheitsstandards und die Standards der Herstellungs- und Prüfverfahren sowie die Standards über Lagerungs- und Verpackungsvorschriften. Standardisierte Herstellungsverfahren beispielsweise erlauben das ständige Herbei-

führen der günstigsten Bedingungen für die Produktion; sie ermöglichen dadurch, daß Erzeugnisse von gleichmäßiger und für den vorgesehenen Verwendungszweck bestmöglich geeigneter Beschaffenheit entstehen. In der DDR besteht zwischen Standards und Gütezeichen ein unmittelbares Abhängigkeitsverhältnis. Die Einhaltung der Beschaffenheitsstandards für Erzeugnisse ist mitunter Voraussetzung dafür, ob die Gütezeichen „Q“ oder „1“ erteilt und auf den Erzeugnissen angebracht werden dürfen.

Wissenschaftliche Arbeitsorganisation. Die Standardisierung fördert die wissenschaftliche Arbeitsorganisation (WAO). Standards sind Mittel zur Durchsetzung der WAO und damit der sozialistischen Arbeitskultur. Diese Wirkung bezieht sich erstens auf die Aufnahme arbeitswissenschaftlicher Gesichtspunkte in Grundlagenstandards (z. B. TGL 29432 Rahmenmethodik zur Bewertung der Qualität industrieller Erzeugnisse, TGL 29513 Komplexe Maßnahmen der Qualitätssicherung und Standardisierung), zweitens auf das Erarbeiten und Anwenden von Standards über arbeitswissenschaftliche Gegenstände und Instrumentarien (z. B. TGL 10678 Bauphysikalische Schutzmaßnahmen – Schallschutz, TGL 2860-56 Zeitgliederung in der Produktion). Drittens fördert die Standardisierung die Aufwandsnormung, und zwar dadurch, daß sie ermöglicht, in ständig steigendem Maße einheitliche, überbetrieblich geltende Arbeitszeitnormen, Besetzungsnormen und Materialverbrauchsnormen auszuarbeiten und auch anzuwenden. Durch Standardisierung der Beschaffenheit der Arbeitsmittel, Arbeitsgegenstände und Erzeugnisse sowie der Herstellungsverfahren werden z. B. die Produktions- und Instandhaltungsbedingungen angeglichen, indem die unnötige Vielgestaltigkeit der Einzelteile, Maschinen, Apparate und Anlagen beseitigt und die konzentrierte Produktion großer Fertigungsmengen in spezialisierten Betrieben mit moderner Technik ermöglicht wird. Die Standardisierung fördert die WAO schließlich dadurch, daß sie ein einheitliches Vor-

gehen in deren Grundfragen herbeizuführen hilft. Die Verständigungsmittel (Begriffsinhalte und -bezeichnungen, Abkürzungen und Symbole, Schemata der Zeitgliederung u. a.), die Methoden und Hilfsmittel des Arbeitsstudiums und der Arbeitsnormung sollten deshalb standardisiert sein.

Gesunderhaltung der Menschen. Die Standardisierung muß mit ihren Möglichkeiten dazu beitragen, allen Bürgern die Gesundheit und Schaffenskraft zu erhalten. Das geschieht beispielsweise durch Standardisierung der Beschaffenheit der Arzneimittel sowie der arbeitshygienischen und arbeitsschutztechnischen Vorschriften.

Verständigung. Nicht nur durch die Standardisierung der Verständigungsmittel (Begriffe, Bezeichnungen, Symbole u. a.), sondern auch durch die Festlegungen in Beschaffenheitsstandards und in Verfahrensstandards, beispielsweise über die einheitliche Anwendung einer Neuerermethode, kann diese Aufgabe erfüllt werden.

10.3. Grundsätze der Standardisierung

Damit die Standardisierung ihre Aufgaben erfüllen kann, muß die Standardisierungsarbeit nach bestimmten Grundsätzen durchgeführt werden. Das sind zunächst solche Grundsätze, die auch, aber nicht nur für die Standardisierung gelten:

- demokratischer Zentralismus,
- Planmäßigkeit,
- Wissenschaftlichkeit,
- sozialistische Gemeinschaftsarbeit,
- sozialistischer Internationalismus,
- Komplexität,
- Durchsetzung und Kontrolle sowie
- Wirtschaftlichkeit.

Darüber hinaus gibt es weitere Grundsätze, die der Standardisierung eigen sind:

Austauschbarkeit und Wiederholbarkeit. Standards sollen die Austauschbarkeit von Einzelteilen, Baugruppen und ganzen Aggregaten ermöglichen und damit die Teile, Anlagen und Projekte soweit als möglich

wiederholbar gestalten. Beispiele für konsequentes Anwenden dieses Grundsatzes sind Wiederhol- und Standardteile sowie Mehrzweckapparate und Wiederverwendungsprojekte.

Anwenden des Baueinheitenprinzips. Das Baueinheitenprinzip ermöglicht das Schaffen standardisierter Bauelemente („Bausteine“ können Bauteile, Baugruppen und Baueinheiten sein) und deren Zusammensetzen zu Erzeugnissen, Maschinen, Anlagen, Apparaturen, Bauwerken und Systemen unterschiedlicher Funktion nach vorher festgelegten Programmen. Standardisierte Bauelemente sind austauschbar und wiederholbar; sie sind weiterhin kombinierbar und variationsfähig, zum Teil auch wiederverwendbar. Das Anwenden des Baueinheitenprinzips ist also eine besonders wirkungsvolle Möglichkeit, um gemäß dem Grundsatz der Austauschbarkeit und Wiederholbarkeit zu verfahren. Beispiele für das Anwenden des Baueinheitenprinzips sind bei den Laborgeräten, im Bauwesen, bei Werkzeugmaschinen u. a. anzutreffen. Bei der Standardisierungsarbeit muß künftig das Baueinheitenprinzip stärker als bisher beachtet werden, weil dadurch wesentliche Vorteile für die Volkswirtschaft entstehen: konzentrierte Produktion der Bauelemente in spezialisierten Betrieben mit mechanisierten und automatisierten Verfahren, Erfüllen vielfältiger Wünsche der Verbraucher durch Kombinierbarkeit, verbesserte Ersatzteilversorgung – und zwar auch im internationalen Maßstab –, Erleichterung des Reparaturwesens u. a.

Anwenden von Vorzugszahlen. Die Standardisierung bewirkt, daß in allen dafür geeigneten Fällen für Abmessungen, Massestufungen u. a. dezimalgeometrische Vorzugszahlenreihen angewendet werden können, auf die im Abschnitt 10.9. näher eingegangen wird. Vorzugszahlen sind in vielen Fällen zwingende Voraussetzung für die Austauschbarkeit und Wiederholbarkeit sowie für das Anwenden des Baueinheitenprinzips.

Festlegen des Höchststandes, entsprechend dem Verwendungszweck. Damit Standards Mittel für das Durchsetzen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts sein können, müssen sie selbst Kennwerte enthalten, die dem Höchststand entsprechen. In diesem Zusammenhang wird oft von *progressiven Kennwerten* gesprochen. Progressive Kennwerte sind solche Kennwerte, auf Grund deren die Qualität der Erzeugnisse, die Qualität der Prüfverfahren und der Herstellungsverfahren u. a. verbessert werden kann, z. B. um die gegenwärtige Laufleistung der Reifen zu verlängern und Neuerer Methoden einzuführen. Zwischen den in die Standards aufgenommenen Kennwerten und den Gütezeichen der DDR besteht ein direkter Zusammenhang. So können nur solche Erzeugnisse des Gütezeichens „Q“ erhalten, die in ihren Kennwerten und Zuverlässigkeitskennwerten Spitzenzeugnisse auf dem Weltmarkt darstellen, also den fortgeschrittenen internationalen Stand mitbestimmen. Solche Erzeugnisse, die in ihren Kennwerten anderen, auf dem Weltmarkt angebotenen Erzeugnissen vergleichbar sind, erhalten das Gütezeichen „1“.

Festlegen der erforderlichen Vielfalt. Die Standardisierung muß bewirken, daß für alle Güter die gemäß dem jeweiligen Verwendungszweck erforderliche Anzahl von Größen und sonstigen Beschaffenheitsmerkmalen zur Verfügung steht. Gegenwärtig besteht noch in vielen Fällen eine unnötige Vielfalt, die mit der Zersplitterung der Produktion und sogenannten *Warenhausprogrammen* zusammenhängt. Das Herbeiführen der erforderlichen Vielfalt durch Einschränken ist aber nur eine Seite der Standardisierung. Eine andere Seite ist das Ausweiten der Sortimente. Das gilt beispielsweise für die Plasterzeugnisse, die in der Volkswirtschaft umfassend angewendet werden sollen. Zum Beispiel werden nach TGL 11689 Rohre aus Hartemulsionspolyvinylchlorid statt wie früher in nur drei Druckstufen mit 34 Abmessungen jetzt in

sechs Druckstufen mit 94 Abmessungen hergestellt.

Gleichlauf mit Forschung und Entwicklung. Die Standardisierung wurde in den letzten Jahren vor allem im Nachlauf zur Produktion durchgeführt, und zwar mit dem Ziel, die unnötige Vielfalt einzuschränken. Soll die Standardisierung die ihr in der weiteren Entwicklung gestellten Aufgaben erfüllen, dann muß sie sich im Gleichlauf mit der Produktionsvorbereitung bewegen. Hier liegt die Hauptaufgabe für die Standardisierung. Deshalb gilt eine Forschungsaufgabe nur unter der Voraussetzung als gelöst, daß gleichzeitig der betreffende Standardentwurf vorliegt.

10.4. Hemmnisse

Die Standardisierung in der DDR wird mitunter noch durch *Voreingenommenheiten* gehemmt, deren Ursache vor allem politisch-ideologische Unklarheiten über den Inhalt und das Ziel der Standardisierung in der DDR und im sozialistischen Weltsystem sind. Dabei treten Bedenken wegen *kultureller Verarmung, Uniformierung, Erstarrung der technischen Entwicklung und Bevormundung des konstruktiven Schaffens* hervor. Die genannten Vorurteile sind unbegründet, weil die Standardisierung das Ziel hat, die Erfordernisse des ökonomischen Grundgesetzes des Sozialismus bestmöglich herbeiführen zu helfen, weil deshalb dem Sozialismus sogenannte Uniformierungstendenzen fremd sind und weil Standards ein Mittel zum Durchsetzen des wissenschaftlich-technischen Fortschrittes sind. Derartige Voreingenommenheiten gegen die Standardisierung verlieren mit dem wachsenden Bewußtsein der Werktätigen und mit zunehmenden Erfolgen der Standardisierung immer mehr an Bedeutung. Für die Standardisierung bestehen *objektive Grenzen*, die vom Entwicklungsstand der Produktivkräfte und von den herrschenden Produktionsverhältnissen bestimmt werden. Die Grenzen der Standardisierung

können im Sozialismus weiter gezogen werden als im Kapitalismus. Grenzen setzt der Standardisierung erstens der *Verwendungszweck* des Arbeitsgegenstandes, Arbeitsmittels oder Erzeugnisses. Das gilt z. B. für einzelne Schädlingsbekämpfungsmittel, weil relativ schnell Resistenz bei den Schädlingen gegenüber einem Bekämpfungsmittel hervorgerufen wird, so daß oft die Zusammensetzung dieser Mittel geändert bzw. völlig neue Mittel angewendet werden müssen. Eine Grenze wird der Standardisierung zweitens durch den *wissenschaftlich-technischen Fortschritt* gezogen. Das trifft beispielsweise bei solchen neuentwickelten Erzeugnissen zu, deren chemische Beschaffenheit noch nicht genau bekannt ist oder zu deren Prüfung erst besondere Prüfverfahren und Prüfgeräte geschaffen werden müssen. Eine dritte Grenze wird durch die *Wirtschaftlichkeit* bestimmt. Standardisierung darf nie Selbstzweck sein, sondern muß immer zu einem gesellschaftlichen Nutzen führen. Diese Grenze würde z. B. überschritten, wenn Toleranzen oder Forderungen in bezug auf zulässige Beimengungen festgelegt werden, die, gemessen am vorgesehenen Verwendungszweck, überspitzt sind und zur Qualitätsverschwendung führen, wodurch gesellschaftliche Arbeit vergeudet wird. Viertens sind durch *ästhetische Gesichtspunkte* bestimmte Grenzen gezogen. Das bedeutet aber nicht, daß z. B. Erzeugnisse der Textilindustrie nicht standardisiert werden könnten. Erinnert sei nur daran, daß das Herstellen der Konfektionserzeugnisse die Standardisierung der Größen zur Voraussetzung hatte; auch sind Beschaffenheitsstandards der Gewebe für die Textilindustrie zweckmäßig. Eine unterschiedliche, den ästhetischen Güteforderungen der Verbraucher entsprechende Gestaltung der Erzeugnisse kann oft bei den letzten Bearbeitungsvorgängen vorgenommen werden, z. B. durch die Farbgebung, während bei den vorhergehenden Fertigungsvorgängen weitgehend standardisierte Teile oder Zwischenprodukte verwendet werden können.

Die *Ausweitung der im Sozialismus zu beachtenden Grenzen der Standardisierung* erfolgt erstens mit der weiteren Entwicklung und Festigung des sozialistischen Bewusstseins der Werktätigen, u. a. durch die sozialistische Gemeinschaftsarbeit, sowie zweitens durch die ständig fortschreitende Technik im Sozialismus, wodurch vom Entwicklungsstand der Produktivkräfte abhängige Grenzen entfallen. Für die noch in der DDR vorhandenen Grenzen der Standardisierung bestehen große Ausweitungsmöglichkeiten.

10.5. Organe und Planung

In der DDR sind vor allem folgende Organe auf dem Gebiet der Standardisierung tätig:

1. *Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung* (ASMW) als Funktionalorgan des Ministerrates der DDR. Das ASMW ist das planende, anleitende, koordinierende und kontrollierende Zentrum der Standardisierung in der DDR.
2. *Koordinierungsstelle für Standardisierung* (KfS) als Funktionalorgan des Leiters der betreffenden zentralen Staatsorgane, u. a. der Ministerien.
3. *Zentralstelle für Standardisierung* (ZfS) als Funktionalorgan des Generaldirektors der VVB. Mitunter ist die ZfS als *Abteilung für Standardisierung* einem Wissenschaftlich-Technischen Zentrum der VVB (WTZ) zugeordnet.
4. *Büro für Standardisierung* (BfS) als Funktionalorgan des Werkleiters. In kleineren Betrieben arbeitet nur ein *Beauftragter für Standardisierung*.

Für das Herausarbeiten der Haupttrichtungen der Standardisierung, für das Planen, Ausarbeiten und Einführen von den dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt entsprechenden Standards, für das Konzentrieren und Spezialisieren der Produktion, für das Kontrollieren der Einhaltung und für das Überarbeiten der Standards sind die jeweiligen staatlichen Leiter, z. B. der Generaldirektor oder der Werkleiter, verantwortlich.

Auf internationaler Ebene arbeiten vor allem folgende Organe für Standardisierung:

1. *Ständige Kommission für Standardisierung* (SKS) des Rates für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW).
2. *Institut für Standardisierung* des RGW in Moskau.
3. Ständige Fachkommissionen des RGW für die einzelnen Gebiete, z. B. Bauwesen und Chemie.
4. *Internationale Organisation für Standardisierung* (ISO), der sowohl sozialistische als auch kapitalistische Länder angehören. Ihre Arbeitsergebnisse sind die *ISO-Empfehlungen*.

Standardisierungsaufgaben stehen in untrennbarem Zusammenhang mit dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt und sind deshalb integrierender Bestandteil seiner Planung in den verschiedenen Etappen. Standardisierungsaufgaben werden in die Planung *Wissenschaft und Technik* einbezogen. Grundlage der Planung ist die „Nomenklatur der Arbeitsstufen und Leistungen von Aufgaben des Planes Wissenschaft und Technik“. Durch diese Regelung wird der Gleichlauf der Standardisierung mit der Produktionsvorbereitung gefördert.

10.6. Ausarbeitung und Einsatz

Das Ausarbeiten von Standards umfaßt entsprechend der o. a. Nomenklatur in der DDR vier Arbeitsstufen: Analysen und Studien (AS), Ausarbeitung des Standardentwurfes (S6), Bestätigung des Standards (S11) und Einführung des Standards (S12). Im einzelnen müssen folgende Schritte gegangen werden:

Anregung und Aufgabenstellung. Die Anregung wird oft durch die Lösung einer Planaufgabe zur *Untersuchung von Komplexen* gegeben. Es sind die Aufgabenstellung, der Beauftragte der Planaufgabe und das Mitarbeiterkollektiv sowie der zur Stellungnahme des ausgearbeiteten Entwurfs verpflichtete Personenkreis festzulegen.

Feststellen und Prüfen der Erscheinungsformen und der Anforderungen. Alle erreichbaren Unterlagen über das zu standardisierende Erzeugnis, insbesondere Kennwerte vergleichbarer Erzeugnisse anderer Länder, müssen gesammelt und ausgewertet werden. Weiterhin müssen alle an das Erzeugnis oder Verfahren zu stellenden Anforderungen hinsichtlich des Verwendungszweckes zusammengestellt und auf ihre Zweckmäßigkeit geprüft werden. Dazu gehören: Angabe der fortgeschrittensten Kennwerte, Konkretisierung des Verwendungszweckes, Festlegen der bestmöglichen Ausführungsarten, wie z. B. Anwenden des Baueinheitenprinzips, Bedarfsermittlung, Aufwand an gesellschaftlicher Arbeit je Erzeugniseinheit entsprechend dem optimalen Herstellungsverfahren.

Ermitteln der Lösungswege und der Bestlösung. Bei der Lösung von Standardisierungsaufgaben bestehen oft mehrere Lösungsmöglichkeiten. Damit die Bestlösung gefunden wird, muß der gesellschaftliche Nutzen der verschiedenen Varianten ermittelt werden [4]. Der *gesellschaftliche Nutzen der Standardisierung* ist die Differenz zwischen den positiven Auswirkungen der Standardisierungsmaßnahme einerseits und dem Aufwand zum Ausarbeiten und Einführen des Standards sowie eventuellen negativen Auswirkungen andererseits. Er tritt als Komplex ökonomischer, politischer, sozialer und kultureller Auswirkungen im Betrieb (Hersteller, Handel, Verbraucher), in der Volkswirtschaft und im internationalen Rahmen auf. Die Auswirkungen werden entweder als quantifizierbarer Nutzen in Kennzahlen (Selbstkosten, Gewinn, Preis, Arbeitsproduktivität, Anzahl und Qualifikation der Arbeitskräfte, Qualität der Erzeugnisse, Materialverbrauch u. a.) ausgedrückt, oder sie sind nicht quantifizierbar und müssen in beschreibenden Angaben festgehalten werden (z. B. Verbesserung der Arbeitsschutzbedingungen und der Verständigung). Der Nutzen wird also durch ein System von Kennzahlen und beschreibenden Angaben ausgedrückt. Ver-

änderungen der Materialkosten können beispielsweise nach folgender Formel ermittelt werden:

$$V_M = n \cdot (M_1 \cdot P_{M1} - M_2 \cdot P_{M2})$$

V_M	= Veränderung der Materialkosten
n	= Erzeugnismenge im Jahr
M_1	= Materialmenge für ein Erzeugnis vor Einführen des Standards
M_2	= Materialmenge nach Einführung des Standards
P_{M1}	= Materialpreis vor Einführung des Standards
P_{M2}	= Materialpreis nach Einführung des Standards

Der Nutzen aus Standardisierungsmaßnahmen wird in der Regel als Bestandteil des Nutzens der neuen Technik ausgewiesen.

Ausarbeiten des Standardentwurfs. Nach der Auswahl der Bestlösung kann der Inhalt des künftigen Standards fixiert werden, z. B. mögliche Lösungswege und Bestlösung, Festlegen von Typen und Leistungsreihen, Reinheitsgraden, Art der Herstellungs- und Prüfverfahren. Dieser Entwurf wird vom Generaldirektor der VVB bzw. vom Vorsitzenden des Bezirkswirtschaftsrates bestätigt. Um eine termingerechte bzw. vorfristige Bestlösung der gestellten Aufgaben zu erreichen, werden in ständig steigendem Maße Wirtschaftsverträge über Standardisierungsleistungen abgeschlossen und persönliche materielle und ideelle Stimuliformen angewendet, z. B. Zielsetzungsprämien. Gemeinsam mit dem Standardentwurf sollen die Maßnahmen zur Einführung des Standards ausgearbeitet werden: Termine für die Einführung des Standards und für die Ablösung der Erzeugnisse und Verfahren, die nicht mehr verwendet werden dürfen, Festlegen der Frist, während der Ersatz- und Verschleißteile für die aus der Produktion gezogenen Erzeugnisse noch bereitgestellt werden müssen, Konzentration der Produktion und Spezialisierung der Betriebe, Bereitstellen der erforderlichen Produktionsmittel, erforderliche Investitionen, preisrechtliche Fragen.

Veröffentlichen oder Bekanntmachen des Standardentwurfs. Die Veröffentlichung der

Entwürfe erfolgt zum größten Teil in den Mitteilungsheften der Standardisierungsorgane, gegebenenfalls auch in anderen Zeitschriften und Mitteilungsblättern. Manchmal reicht ein Bekanntmachen (Titel, Standardnummer, Bezugsquelle des Entwurfs) in den „Mitteilungen des ASMW“ aus. Wenn jetzt noch Einsprüche oder Abänderungsvorschläge eingehen, werden diese geprüft und, soweit sie berechtigt sind, bei der Überarbeitung berücksichtigt.

Prüfen des überarbeiteten Standardentwurfs.

Der überarbeitete Standardentwurf wird entweder bei der Verteidigung der entsprechenden Aufgaben von Wissenschaft und Technik oder in speziellen Prüfungsausschüssen geprüft. Gesichtspunkte für die Prüfung sind: technische und ökonomische Bestlösung, Maßnahmen zur Einführung, standardtechnische Gestaltung. Im Falle von Beanstandungen muß der Entwurf nochmals überarbeitet werden.

Bestätigen des Standards. Solche Standards mit Festlegungen grundsätzlicher Art, die eine große volkswirtschaftliche Bedeutung haben, werden vom Präsidenten des ASMW als DDR-Standards und solche mit vergleichsweise geringerer Wirkungsbreite vom Generaldirektor der VVB oder des Kombinats, der für die jeweilige Erzeugnisgruppe verantwortlich ist, als Fachbereichsstandard bestätigt. Die bestätigten Standards werden durch Anordnung im Gesetzblatt der DDR verkündet, wodurch sie rechtswirksam werden.

Ein ausgearbeiteter Standard erfüllt nur dann seine Aufgabe, wenn er auch angewendet wird, d. h., wenn er in der Produktion eingeführt bzw. durch alle in Frage kommenden Stellen beachtet wird. Standards müssen also durchgesetzt werden. Es gibt verschiedene Hemmnisse, die größtenteils subjektiver Art sind, für das Wirksamwerden der Standards in der Praxis. Geeignete Maßnahmen für das Überwinden dieser Hemmnisse sind:

Überzeugen der Voreingenommenen. Das kann am besten dadurch geschehen, daß

auf den durch den Standard entstehenden Nutzen für die Gesellschaft und damit auch für den Betrieb sowie für den einzelnen hingewiesen wird.

Anwenden von Stimulierungsformen. Große Bedeutung hat die richtige Preisgestaltung. Preise für standardisierte Erzeugnisse sind häufig niedriger als für nicht standardisierte festgesetzt. Des weiteren sollten zentralisiert hergestellte Teile billiger als in mehreren Betrieben in Einzelfertigung oder niedriger Losgröße gefertigte Teile sein. Für unterschiedliche Sorten oder Erzeugnisse mit unterschiedlichen Gütezeichen sollten differenzierte Preise mit Hilfe von Preiszuschlägen und Preisabschlägen gelten, wie das z. B. für Chemiefaserstoffe zutrifft (Preis für Sorte 1 ist im Durchschnitt 20 Prozent höher als der für Sorte 2, Preis für Qualitäten unterhalb der TGL-Forderungen ist im Durchschnitt um 40 Prozent niedriger als der für Sorte 2). Ein wirksamer Stimulus können auch Gewinnabschläge sein. In der VVB Bergbauausrüstungen und Förderanlagen werden Gewinnabschläge wirksam, wenn Standards verspätet eingeführt oder nicht eingehalten oder wenn Termine für die zentrale Fertigung nicht eingehalten werden. Schließlich sind als Stimuli z. B. Prämien für die Einführung von Standards oder für die optimale Verwendung von Bauelementen zu nennen.

Zwangsmaßnahmen. Standards können gegebenenfalls auch durch Zwangsmaßnahmen durchgesetzt werden, z. B. durch Ordnungsstrafen, Vertragsstrafen oder Produktionsstopp.

Sind Standards in der Produktion eingeführt, muß ihre Einhaltung laufend kontrolliert werden, damit sie ständig bestmöglich wirksam sind. Für die *Kontrolle der Einhaltung von Standards* haben außer den staatlichen Leitern und den Organen für Standardisierung vor allem der Freie Deutsche Gewerkschaftsbund und die Kammer der Technik große Verantwortung. Bei Verstößen gegen geltende Standards müssen entsprechende Maßnahmen durch die staatlichen Leiter eingeleitet werden.

Die ständige Weiterentwicklung der Produktivkräfte erfordert auch eine Weiterentwicklung der Standards. Standards müssen alle 5 Jahre überprüft bzw. überarbeitet werden. Die Überarbeitung erfolgt nach den genannten Stufen für die Ausarbeitung. Wurde ein Standard überarbeitet, dann werden der neue Standard sowie der überholte Standard im Gesetzblatt der DDR bekanntgegeben bzw. außer Kraft gesetzt.

10.7. Dezimalklassifikation

Auf den Standardblättern und bei vielen Zeitschriftenartikeln werden sogenannte „DK“-Zahlen angegeben, die im folgenden kurz erläutert werden sollen. Die Dezimalklassifikation ist das umfassendste, systematische Ordnungssystem, das sich international durchgesetzt hat. Die Vorteile sind: 1. Die Dezimalklassifikation umfaßt alle Wissensgebiete. 2. Zur Kennzeichnung der Gebiete und Begriffe werden fast ausschließlich Zahlen verwendet, die dezimal geordnet werden. Dadurch ist die Dezimalklassifikation international anwendbar. Das hat den Vorteil, daß man ohne Kenntnis der Fremdsprache den Inhalt eines ausländischen Standards oder einer ausländischen Veröffentlichung aus der DK-Zahlerkennung kann. 3. Mit Hilfe zusammengesetzter Zahlen können auch zusammengesetzte Begriffe ausgedrückt werden. 4. Die Dezimalklassifikation ist so aufgebaut, daß die durch die Weiterentwicklung aller Wissenschaften entstehenden Neuerungen und Ergänzungen zusätzlich in das vorhandene System aufgenommen werden können, ohne daß das Bestehende geändert zu werden braucht.

Das gesamte Wissen der Menschheit ist in zehn Hauptgruppen eingeteilt:

- 0 Allgemeines, Bibliographie, Bibliothekswesen
- 1 Philosophie, Psychologie
- 2 Religion, Theologie
- 3 Sozialwissenschaften, Recht, Verwaltung
- 4 frei
- 5 Mathematik, Naturwissenschaften
- 6 Angewandte Wissenschaften, Medizin, Technik
- 7 Kunst, Kunstgewerbe, Spiel, Sport

8 Sprachwissenschaft, Literaturwissenschaft, schöne Literatur

9 Heimatkunde, Geographie, Biographien, Geschichte

Diese Hauptgruppen können nun weiter in *Hauptabteilungen* unterteilt werden, z. B. Hauptgruppe 6:

- 60 Allgemeines
- 61 Medizin
- 62 Ingenieurwesen, Technik im allgemeinen
- 63 Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd, Fischerei
- 64 Hauswirtschaft
- 65 Handels- und Verkehrstechnik
- 66 Chemische Technik, Chemieindustrie, verwandte Industrien
- 67 Verschiedene Industrien und Gewerbe, mechanische Technologie
- 68 Fortsetzung von 67
- 69 Bauarbeiten, Bauhandwerk, Baustoffe, Hausbau, Wohnungen

Die Hauptgruppen und Hauptabteilungen werden nun wiederum unterteilt:

- 5 Mathematik, Naturwissenschaften
- 53 Physik
- 531 Allgemeine Mechanik, Mechanik fester Körper, Mechanik starrer Körper
- 531.7 Messung geometrischer und mechanischer Größen
- 531.71 Längenmessung
- 531.716 Längenausmaß des täglichen Lebens, technische Meßverfahren, Maßstäbe, Meßbänder, Meßzirkel

Einen Standard oder eine Veröffentlichung z. B. über Meßbänder erkennt man also an der DK-Zahl 531.716 (gesprochen in Ziffern: fünf drei eins – Punkt bedeutet Sprechpause – sieben eins sechs). Zur Kennzeichnung eines Gegenstandes ist die Zahl der Dezimalen nicht begrenzt. Die DK-Zahl ist um so viestelliger, je enger der damit dargestellte Begriff ist. Zusammengesetzte Begriffe, z. B. Statistik der Chemieindustrie, werden durch zusammengesetzte DK-Zahlen ausgedrückt, die durch einen Doppelpunkt getrennt sind: DK 31:66.

Neben den Haupt-DK-Zahlen gibt es noch „Anhängenzahlen“, die an die Haupt-DK-Zahlen angehängt werden. Zum Beispiel allgemeine Anhängenzahlen, die einen Gesichtspunkt kennzeichnen: .003 bedeutet Wirtschaftlichkeit (DK 66.003 wäre ein Artikel über die Wirtschaftlichkeit der Chemieindustrie). Weitere Einzelheiten siehe [5].

10.8. Vorzugszahlen

Die Vielzahl der möglichen Abmessungen ist unübersehbar, und es besteht ein Bedürfnis nach einer Auswahl von Zahlen, die einfach zu handhaben ist, so daß für möglichst viele Zwecke immer wieder auf die gleichen Zahlen zurückgegriffen werden kann. Aus dem gesamten Zahlenbereich muß eine möglichst eng begrenzte Auswahl getroffen wer-

den, die zur Bildung systematisch aufgebauten Reihen geeignet sein muß. Diese Auswahl ist durch die Vorzugszahlen gegeben, die international (ISO-Empfehlung R 3) und im nationalen Bereich standardisiert sind. Die mathematischen Grundlagen sind folgende:

1. Arithmetische Reihen haben eine konstante Differenz zwischen zwei Gliedern. Die allgemeine Formel entwickelt sich wie folgt:

$$g; g + d; g + 2d; g + 3d \dots g + (n - 1)d;$$

$$g_n = g_1 + (n - 1) d.$$

g_n = beliebiges Glied

g_1 = Anfangsglied

n = Stellenzahl

d = Differenz

2. Geometrische Reihen haben einen konstanten Stufensprung (oder Quotient) zwischen zwei Gliedern. Die allgemeine Formel entsteht wie folgt:

$$g; g \cdot \varphi; g \cdot \varphi^2; g \cdot \varphi^3 \dots g \cdot \varphi^{n-1}$$

$$g_n = g_1 \cdot \varphi^{n-1}.$$

g_n = beliebiges Glied

g_1 = Anfangsglied

φ = Quotient

Häufig wird der Stufensprung gesucht:

$$\varphi = \sqrt[n-1]{\frac{g_n}{g_1}}.$$

3. Dezimalgeometrische Reihen stufen n Glieder geometrisch in einem Zehnerbereich (1 bis 10 oder 10 bis 100 oder 100 bis 1000 u. a.). Die allgemeine Formel lautet:

$$\varphi = \sqrt[n]{10}.$$

Vorzugszahlen sind dezimalgeometrische Reihen. Sie entstehen dadurch, daß für n 5, 10, 20 oder 40 eingesetzt werden, d. h., daß 5, 10, 20 oder 40 Glieder in einem Zehnerbereich geometrisch gestuft werden.

Beispiel: $\varphi = \sqrt[10]{10} = 1,25$

Reihe R 10: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8 und wieder 10; 12,5 usw.

Die Stufensprünge für die Reihen R 5, R 20 und R 40 sind 1,6 und 1,12 sowie 1,06. Geht man von der Vierzigerreihe aus, so enthalten die größeren Reihen das zweite (bei R 20), das vierte (bei R 10) oder das achte Glied (bei R 5):

Grundreihen

R 5	R 10	R 20	R 40
1,00	1,00	1,00	1,00
			1,06
		1,12	1,12
			1,18
	1,25	1,25	1,25
			1,32
		1,40	1,40

R 5	R 10	R 20	R 40
1,60	1,60	1,60	1,50
		1,80	1,60
	2,00	2,00	1,70
		2,24	1,80
			1,90
2,50	2,50	2,50	2,00
		2,80	2,12
			2,24
			2,36
	3,15	3,15	2,50
			2,65
		3,55	2,80
			3,00
4,00	4,00	4,00	3,15
		4,50	3,35
			3,55
			3,75
	5,00	5,00	4,00
		5,60	4,25
			4,50
			4,75
6,30	6,30	6,30	5,00
			5,30
			5,60
			6,00
			6,30
		7,10	6,70
			7,10
			7,50
	8,00	8,00	8,00
			8,50
		9,00	9,00
			9,50

Die Vorzugszahlen haben in den letzten Jahren in vielen Ländern eine weitgehende Anwendung gefunden, z. B. bei der Typung im Maschinenbau, bei der Stufung von Halbzeugen, bei Druckstufen, Nennleistungen, Nenndurchmessern und Temperaturstufen von Apparaten für chemische Verarbeitungsverfahren. Auf den Vorzugszahlen beruhen beispielsweise auch die Vorzugsmaße laut TGL 8250, die in den sozialistischen Ländern für alle Konstruktionsmaße verbindlich sind. Die verstärkte Anwendung von Vorzugszahlen hat wesentliche Bedeutung für die Verbesserung der Standardisierung (siehe auch [6]).

10.9. Erreichter Entwicklungsstand und Ausblick

Standardisierungsarbeiten werden seit vielen Jahren in der DDR systematisch durch-

geführt. Die Standardisierung ist heute in allen Bereichen der Volkswirtschaft wirksam. Von vielen Menschen wird die Standardisierung als für die Gesellschaft vorteilhaft betrachtet. Die Notwendigkeit der Standardisierung wird allgemein anerkannt. Jetzt gilt es, Aufgeschlossenheit für die erforderliche qualitative Verbesserung der Standardisierungsarbeit und aktive Mitwirkung aller Werktätigen zu erreichen. Das Standardisierungswerk der DDR ist angewachsen und entspricht heute von der Zahl und auch von der Qualität der Standards her den Standardisierungswerken anderer Industrieländer. Gegenwärtig gelten in der DDR etwa 32200 staatliche Standards, davon 5600 DDR-Standards und 26600 Fachbereichstandards. Allein im Zeitraum zwischen dem VIII. und IX. Parteitag der SED wurden 11700 staatliche Standards bezüglich ihrer Wirksamkeit für die Erfüllung der Hauptaufgabe überprüft sowie 14000 DDR- und Fachbereichstandards neu er- bzw. überarbeitet (siehe auch [7]). Die Vereinheitlichung der Standards der UdSSR und der DDR, die Standardisierungsarbeiten im Rahmen des RGW machten große Fortschritte. Dadurch konnten bedeutende Ergebnisse erzielt werden. Das gilt vor allem:

- für die weitere Spezialisierung und Konzentration der Produktion (beispielsweise entwickelte sich von 1971 bis 1975 erstmalig das Teilsortiment langsamer als das Erzeugnissortiment);
- für die Qualitätssteigerung der Erzeugnisse (im Bereich der Industrieministerien stieg in den letzten Jahren beispielsweise die Warenproduktion mit Gütezeichen viel schneller als die gesamte industrielle Warenproduktion);
- für die Senkung des Aufwandes an lebendiger und vergegenständlichter Arbeit (z. B. wird durch die Ausarbeitung von etwa 390 Energieverbrauchsnormativen und ihre Einführung mit Hilfe staatlicher Standards jährlich ein volkswirtschaftlicher Nutzen von 60 Mill. M, bezogen auf Braunkohlenbriketts, erzielt);
- für die weitere Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen der Werktätigen (Standards sind immer besser als Mittel zur Durchsetzung der wissenschaftlichen Arbeitsorganisation, des Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutzes sowie des Umweltschutzes wirksam geworden).

Ausgehend von den Aufgabenstellungen des IX. Parteitages der SED, gilt es, die noch bestehenden Mängel zu überwinden und weitere Fortschritte in der Standardisierungsarbeit zu erreichen. Schwerpunkte sind dabei vor allem:

Durchführung der Standardisierung als Bestandteil der sozialistischen Intensivierung und in Einheit mit Wissenschaft und Technik. „In unmittelbarer Verbindung mit der Arbeit in Forschung und Entwicklung, Konstruktion und Technologie und zur breiten volkswirtschaftlichen Nutzung wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse ist das Niveau der Standardisierung weiter zu erhöhen“ (siehe [2], S. 25). Dazu gehören insbesondere die Erhöhung des Wiederholfaktors der Produktion, die Herstellung des Sortiments an Einzelteilen und Baugruppen in zentralen Fertigungen, die verstärkte Anwendung des Baueinheitenprinzips, der effektivere Einsatz neuer Technologien, die Erreichung einer hohen Qualität der Erzeugnisse, die Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen der Werktätigen und die Rationalisierung der technologischen Produktionsvorbereitung. Die Erkenntnis muß noch besser Platz greifen, daß die Standardisierung selbst eine wissenschaftlich-technische Leistung ist, „die im Prozeß der Neu- oder Weiterentwicklung eines Erzeugnisses oder Verfahrens zu erbringen ist und deren Ergebnis – die Wiederholbarkeit der Anwendung dieses Ergebnisses vorausgesetzt – in Standards fixiert und seine Anwendung damit verbindlich vorgeschrieben wird“ (siehe [7], S. 8).

Durchführung der Standardisierung in enger Zusammenarbeit mit der UdSSR und den

anderen Ländern des RGW. Volkswirtschaftlich wichtige Standards müssen zwischen den sozialistischen Ländern übereinstimmen (siehe auch [2], S. 25). Es geht um ein stärkeres Ausschöpfen der Möglichkeiten, die die internationale Zusammenarbeit der sozialistischen Länder bietet. Standards sollen dem sozialistischen Welt-system nutzen.

Erschließen aller Vorzüge der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit. Standards müssen in Einheit mit dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt geplant, in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit ausgearbeitet (Naturwissenschaftler, Ingenieure, Ökonomen und Produktionsarbeiter; Vertreter von Produktion, Handel, Verbrauch, Außenhandel, Instandhaltung, Gütekontrolle, Wissenschaft u. a.), eingeführt (Technologe, Ökonom, Jurist, Produktionsarbeiter u. a.) und kontrolliert werden. Hierher gehört auch die Zusammenarbeit mit den fachlich zuständigen Gremien der Kammer der Technik einschließlich der Gesellschaft für Standardisierung.

Maßnahmen zur Qualifizierung. Dazu gehören nicht nur Qualifizierungsmaßnahmen für auf dem Gebiet der Standardisierung Tätige, sondern auch solche, die geeignet sind, das Unterschätzen der Standardisierung zu überwinden und zu erreichen, daß alle Werktätigen im Rahmen ihrer Möglichkeiten aktiv an Standardisierungsaufgaben mitarbeiten. Qualifizierungsmaßnahmen beginnen deshalb bereits an den Oberschulen und werden z. B. auch an Fach- und Hochschulen durchgeführt. Auch die Kammer

der Technik, insbesondere die Gesellschaft für Standardisierung in der KDT, sowie die Gesellschaft URANIA haben auf diesem Gebiet wichtige Aufgaben zu erfüllen.

Die Bedeutung der Standardisierung nimmt mit der weiteren Entwicklung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts zu. Es gilt, die Standardisierung so zu gestalten, daß sie auch unter den künftigen Bedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der Hauptaufgabe in ihrer Einheit von Wirtschafts- und Sozialpolitik, zur Stärkung unseres Staates und des sozialistischen Weltsystems zu leisten vermag.

10.10. Quellen und weiterführende Literatur

- [1] Programm der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands, Dietz Verlag, Berlin 1976.
- [2] Direktive des IX. Parteitag des SED zum Fünfjahrplan für die Entwicklung der Volkswirtschaft der DDR in den Jahren 1976–1980. Dietz Verlag, Berlin 1976.
- [3] Messing, H., und H. J. Aust: Standardisieren — Rationalisieren. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1968, S. 19 bis 37.
- [4] Autorenkollektiv: Standardisierung in der Deutschen Demokratischen Republik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1963, S. 225 bis 229.
- [5] Messing, H., und H. J. Aust: Standardisieren — Rationalisieren. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1968, S. 177 bis 183.
- [6] Giewald R., und D. Schwerdtner: Vorzugszahlen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964.
- [7] Tagungsmaterial der 4. Standardisierungskonferenz zum Thema „Standardisierung und Wissenschaftliche Arbeitsorganisation in der Volkswirtschaft der DDR“. Sonderdruck. Kammer der Technik, Berlin 1976.



Anhang

11. Ausgewählte ökonomische Statistiken

zusammengestellt von Dr. O. Werk

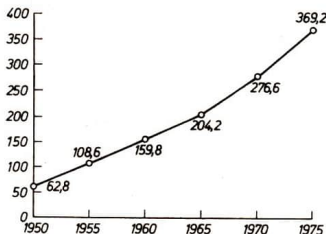


Bild 11.1. Gesellschaftliches Gesamtprodukt in der DDR in Mrd. M zu vergleichbaren Preisen

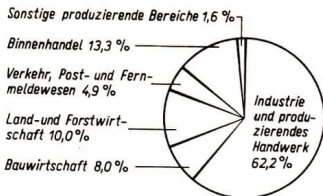


Bild 11.3. Anteil der Wirtschaftsbereiche am Netto-
produkt der DDR — 1975

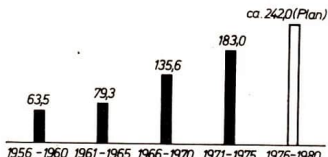


Bild 11.5. Ausgaben für Investitionen in der DDR in Mrd. M

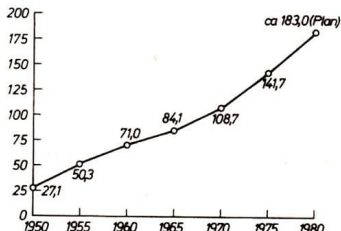


Bild 11.2. Produziertes Nationaleinkommen in der DDR in Mrd. M zu vergleichbaren Preisen

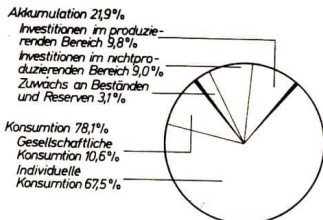


Bild 11.4. Verwendung des Nationaleinkommens im Inland in Prozent — 1975

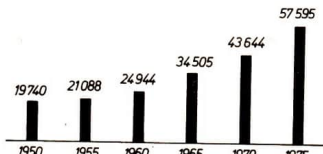


Bild 11.6. Durchschnittlicher Grundmittelbestand je Berufstätiger in den produzierenden Bereichen der Volkswirtschaft in der DDR in M

Energie- und Brennstoffindustrie	278 491M
Chemische Industrie	136 070M
Metallurgie	103 858M
Maschinen- und Fahrzeugbau	40 120M
Elektrotechnik/Elektronik/ Gerätebau	30 662M

Bild 11.7. Durchschnittlicher Grundmittelbestand je Berufstätiger in ausgewählten Industriebereichen in M – 1975

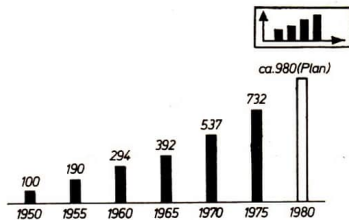


Bild 11.8. Index der industriellen Bruttoproduktion in der DDR (1950 = 100 %)

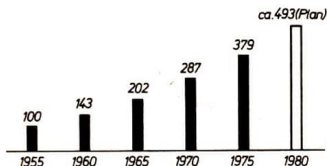


Bild 11.9. Index der Produktivität je Produktionsarbeiter in der Industrie der DDR (1955 = 100 %)

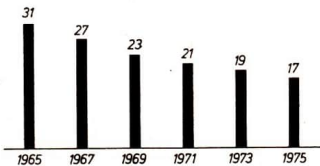


Bild 11.10. Arbeitsaufwand je 1000 Mark industrielle Bruttoproduktion in der sozialistischen Industrie der DDR in Stunden

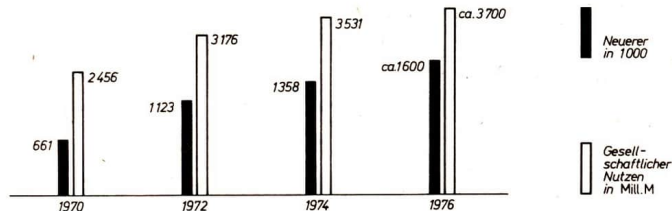


Bild 11.11. Neuererbewegung in der volkseigenen Wirtschaft der DDR

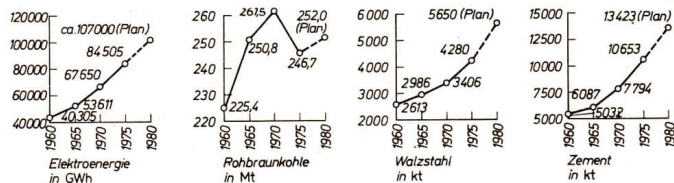


Bild 11.12. Produktion ausgewählter industrieller Erzeugnisse

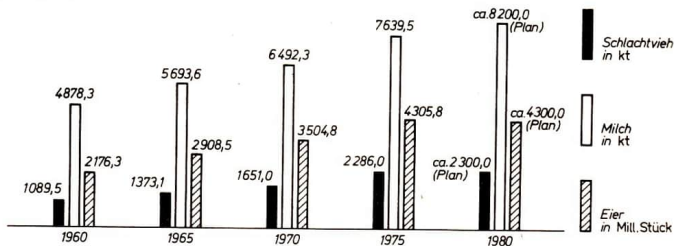


Bild 11.13. Staatliches Aufkommen landwirtschaftlicher Erzeugnisse

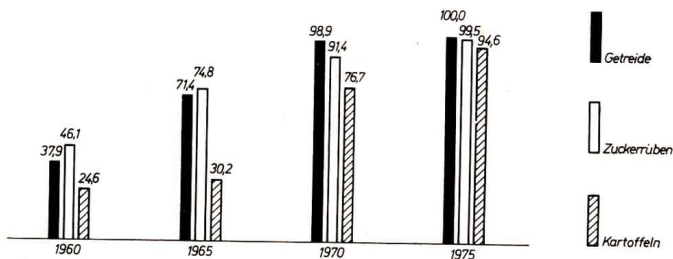


Bild 11.14. Anteil der mit Großmaschinen durchgeführten Erntearbeiten in der sozialistischen Landwirtschaft in Prozent

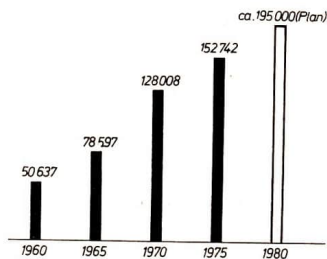


Bild 11.15. Gütertransportleistungen in Mill. Tonnen-kilometer

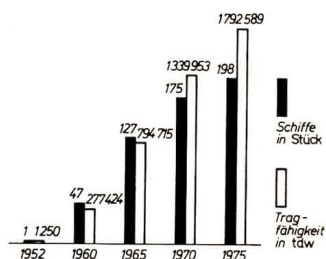


Bild 11.16. Handelsflotte der DDR

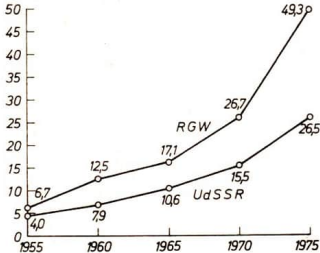


Bild 11.17. Außenhandelsumsatz mit den RGW-Ländern, insbesondere mit der UdSSR, in Mrd. VM

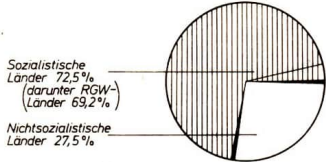


Bild 11.18. Struktur des Außenhandelsumsatzes — 1975

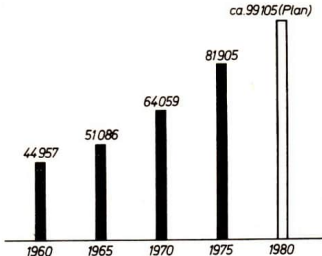


Bild 11.19. Einzelhandelsumsatz in der DDR in Mill. M

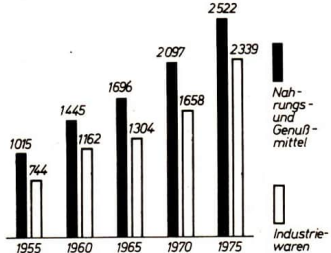


Bild 11.20. Einzelhandelsumsatz pro Kopf der Bevölkerung der DDR in M

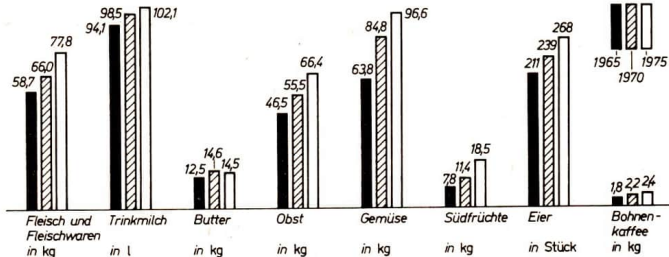


Bild 11.21. Pro-Kopf-Verbrauch wichtiger Nahrungs- und Genussmittel in der DDR

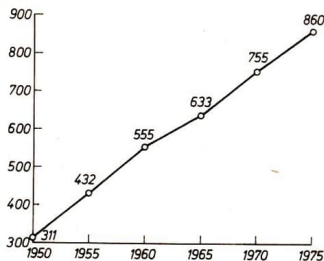


Bild 11.22. Durchschnittliches monatliches Arbeitseinkommen der vollbeschäftigten Arbeiter und Angestellten der sozialistischen Wirtschaft der DDR in M

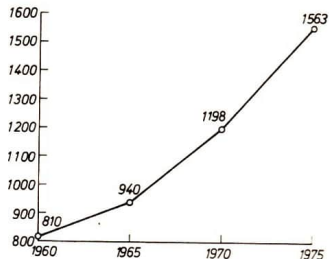


Bild 11.23. Verbrauchswirksames Realinkommen der Arbeiter- und Angestelltenhaushalte der DDR in M

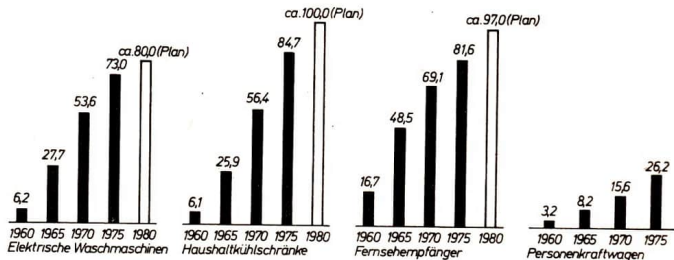


Bild 11.24. Bestand an langlebigen Konsumgütern je 100 Haushalte der DDR

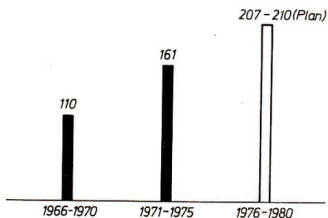


Bild 11.25. Zuwendungen des Staates aus gesellschaftlichen Fonds in Mrd. M

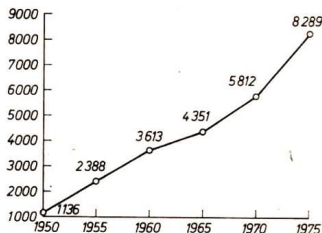


Bild 11.26. Ausgaben des Staatshaushaltes für das Bildungswesen in Mill. M

12. Zeittafel zur Entwicklung der modernen Produktivkräfte

zusammengestellt von Prof. Dr. habil. S. Richter

Den entscheidenden Anstoß für ihre Weiterentwicklung erhielten die modernen Produktivkräfte durch die *Industrielle Revolution* Ende des 18./Anfang des 19. Jahrhunderts. (Unterschiedlicher Beginn und Verlauf in den einzelnen europäischen Ländern.) Sie löste die arbeitsteilig-kooperative, jedoch auf der *Handarbeit* beruhende *Manufaktur* ab durch die maschinell produzierende Fabrik und schuf in Gestalt der „Großen Industrie“ (*Marx*) und des modernen Industrieproletariats die materiell-technische Basis der kapitalistischen Produktionsweise. Ausgangspunkt ist die massenhafte Anwendung von Arbeits- (Werkzeug-) Maschinen, die ihrerseits die Voraussetzung abgab für eine massenhafte Anwendung einer neuen Antriebsmaschine, der Dampfmaschine. Trotzdem bleibt der Mensch die für den *unmittelbaren* Produktionsprozeß bedeutendste Produktivkraft, wenngleich in Gestalt der Maschine die Wissenschaft ihren unwiderruflichen Einzug in den Produktionsprozeß gehalten hat. Die hervorstechendsten Industriezweige sind die Textilindustrie, die Eisenerzeugung und -verarbeitung und die Montanindustrie. Mit der Eisenbahn entsteht ein den kapitalistischen Produktions- und Distributionsverhältnissen adäquates Massentransportmittel.

1740 Erste Gußstahlfabrik in England

1764 *Hargreaves* erfindet mit der „Spinning Jenny“ erstmals eine Maschine, die (nach Verbesserung durch *Arkwright* 1781) in großer Anzahl angewendet werden konnte

1782 *Watt* baut Dampfmaschine mit Schwungrad

1785 *Cartwright* erfindet den mechanischen Webstuhl

1789 *Lavoisier* begründet die chemische Wissenschaft

1791 Das Meter wird als Längenmaß eingeführt

1793 *Bentham* erfindet die Kreissäge

1794 Das Kugellager wird erfunden

1795 In Paris wird die erste technische Lehranstalt (*Ecole polytechnique*) eingerichtet

1797 *Henry Maudsley* konstruiert die Metaldrehbank und baut den Support mit Schraubspindel an

1800 Die Nähmaschine mit dem Ohr an der Nadelspitze wird erfunden

1802 *Achard* baut eine Fabrik für Rübenzucker

1804 *Trevithick* baut Lokomotive für Schienenbetrieb

1805 *Jacquard* webstuhl zur Herstellung gemusterter Stoffe erfunden

1807 Bandsäge erfunden

Foulton baut das erste brauchbare Dampfschiff

1809 *Sömmering* baut elektrischen Telegraphen

1812 *Ressel* erfindet Schiffsschraube

1814 *Stephenson* erbaut seine erste Lokomotive

Murray baut Metallhobelmaschine

1815 Fräsmaschine mit Schlittenantrieb in Amerika konstruiert

1818 Dampfschiff überquert den Atlantik

1825 Erste Eisenbahn (in England)
Erste zyklische Wirtschaftskrise in England

- 1833 *Babbages* erste Versuche mit einer programmgesteuerten (mechanischen) Rechenmaschine
- 1834 *Runge* entdeckt im Steinkohlenteer Anilin, Karbol, Resol
- 1835 Erste deutsche Eisenbahnstrecke (Nürnberg–Fürth) eröffnet
- 1839 Künstliche Düngung durch *Liebig*; *Nasmyths* erster Dampfhammer
- 1843 Erfindung des Holzschliffpapiers
- 1851 Erste Weltausstellung in London
- 1854 Erfindung der Glühlampe (*Göbel*)
- 1856 Erfindung des *Bessemer*-Verfahrens
- 1857 Erstes Ozeanschiff aus Stahl hergestellt
- 1858 Erstes Übersee- (Atlantik-) Kabel fertiggestellt
- um 1860 Schrämmaschine in den englischen Bergbau eingeführt
- 1860 *Lenoir* erfindet Gasmotor
- 1861 *Philipp Reis* erfindet das Telephon
- 1866 Eisenbetonbau durch *Monier* entwickelt
Siemens erfindet Dynamo
- 1870 Der Suezkanal wird vollendet
- 1871 Künstlicher Indigo (blau) hergestellt durch *Bayer*
- Seit den siebziger Jahren des 19. Jh. beginnt im Bereich der ökonomisch am weitesten entwickelten kapitalistischen Länder (Großbritannien, Frankreich, USA, Deutschland) der Übergang zum Imperialismus. Sein wichtigstes ökonomisches Kennzeichen, das Monopol auf der Grundlage der Konzentration und Zentralisation der Produktion und des Kapitals, beeinflußt die Entwicklung der Produktivkräfte entscheidend (Kombination verschiedener Verarbeitungsstufen in einem Unternehmen, positive und negative Auswirkungen auf den technischen Fortschritt). Allgemein beginnt mit der Anwendung der Elektrizität im Produktionsprozeß (seit den neunziger Jahren des 19. Jh.) der Übergang vom Zentralantriebssystem (Dampfmaschine) zum Gruppen- oder Einzelantrieb (Elektromotor). Das Ergebnis ist die Herausbildung der dreigliedrigen Arbeitsmaschine (Antriebsmaschine – Transmission – Arbeitsmaschine). Die Anwendung der Wissenschaft im Bereich des unmittelbaren Produktionsprozesses intensiviert sich zusehends. Infolgedessen treten solche Industriezweige wie die chemische Industrie und die Elektroindustrie sowie die feinmechanische und optische Industrie und der Maschinenbau immer mehr in den Vordergrund. Auf dieser Basis macht die Herausbildung eines modernen Kommunikationssystems weitere große Fortschritte (Telegraph, Telefon, drahtlose Telegraphie und Telephonie, Automobil, Flugzeug). Mit dem Fließbandssystem erfährt die Mechanisierung schließlich ihre extremste Ausprägung. Hervorstechend ist der Einsatz der modernen Produktivkräfte für militärische Zwecke des Imperialismus.
- 1872 Verbindliche Einführung des metrischen Systems in Deutschland
- 1874 Erfindung des Verfahrens zur Gewinnung von Zellulose aus Holz (*Mitscherlich*)
- 1875 Ammoniak-Kälteverfahren erfunden (*Linde*-Verfahren)
- 1876 *Otto* konstruiert Viertakt-Verbrennungsmotor
Bell verbessert *Reis'* Fernsprechapparat
- 1877 *Edison* verbessert das Mikrofon
- 1878 *Edison* erfindet den Phonographen (Grammophon)
Benz konstruiert ersten Zweitaktmotor
- 1879 Erstmals Anwendung des *Thomas*-Verfahrens in Deutschland (*Hölder* Verein)
Siemens baut erste elektrische Eisenbahn (Berliner Gewerbeausstellung)
- um 1880 In Deutschland beginnt der Bau von mechanischen Rechenmaschinen
- 1880 *Siemens* konstruiert elektrischen Lichtbogenofen zur Erschmelzung von Stahl
- 1880 Gefrierverfahren zum Schachtabteufen entwickelt
- 1881 Erste elektrische Straßenbahn (Berlin – Lichterfelde) von *Siemens & Halske* erbaut

- 1882 Autotypie (Rasterätzung) erfunden
Eröffnung der St.-Gotthard-Bahn
(Tunnel-Viadukt-Gebirgslinie)
Siemens konstruiert elektrische Grubenlokomotive
- 1883 *Daimler* und *Maybach* entwickeln Benzinmotor
Nipkow erfindet Lochscheibe zum Zerlegen und Zusammensetzen des Bildes (Fernsehtechnik)
- 1884 Setzmaschine (Linotype) gebaut
- 1885 *Mannesmann*-Verfahren zur Herstellung nahtloser Rohre erfunden
Benz baut das erste entwicklungsfähige Automobil
- 1886 Entwicklung neuer Arten optischen Glases durch *Schott*, *Abbe* und *Zeiß* in Jena
- 1887 Experimenteller Nachweis der von *Maxwell* theoretisch vorausgesagten Wellen (*Hertz*)
- 1888 Entwicklung des Spannbetonbaues
- 1889 Erfindung des Telephondrehwählers
- 1893 Erfindung der Fotozelle
- 1895 *Röntgen* entdeckt die x-Strahlen
Popow entwickelt drahtlose Telegraphie unter Verwendung von Hochantennen
Taylor entwickelt seine Lehre von der Arbeitsrationalisierung
- 1897 Großtechnische Herstellung des Indigos (*BASF*)
Diesel vollendet Schwerölmotor
- 1898 Kathodenstrahlröhre (*Braunsche Röhre*) erfunden
Die Glühlampe (Metallfadenlampe) wird erstmals industriell hergestellt
- 1899 Erstmalige Herstellung von Kunstfasern
- 1900 Erstmalige Stahlerzeugung mit Hilfe des Induktionsofens und des Lichtbogenelektrostahlofens
Modernes Kugellager (Chrom- und Chromnickelstahl) entwickelt
Entwicklung von Schnellarbeitsstählen in den USA
- 1901 Elektrische Schachtfördermaschine konstruiert
- 1902 Bau des 1. Nilstaudammes bei Assuan beendet
- 1903/04 Erste gesteuerte Motorflüge der Gebrüder *Wright*
- 1903 Erfindung des Sauerstoffschneidverfahrens
Fabrikmäßige Produktion des Automobils (*Ford*)
- 1904 In England wird die Elektronenröhre erfunden
- 1905 Erfindung des Offsetdruckes (USA)
Erfindung des Autogenschweißverfahrens
- 1906 Erste aushärtbare Aluminiumlegierung hergestellt (*Wilm*)
Begründung der Kunstharzindustrie, in Belgien wird Bakelit aus Phenol und Formaldehyd hergestellt
- 1907 Betongießverfahren entwickelt
- 1908 In der Erzeugung von Phenoplasten werden wesentliche Fortschritte erzielt
- 1909 Überquerung des Ärmelkanals mit einem Motorflugzeug
Die erste (technisch noch nicht ausgereifte) Kautschuksynthese gelingt
Neonlicht erfunden
- 1910 Benzol wird erstmals als Motortreibstoff verwendet
- 1912 Der Verschmelzungsprozeß in der deutschen Elektroindustrie ist durch Kooperation zwischen *AEG* und *Siemens-Halske & Schuckert* abgeschlossen
- 1912 In Österreich wird die *Kaplan*-Turbine konstruiert
Der Bau des Panamakanals wird beendet
- 1913 *Ford* führt das Fließband ein
Bergius-Verfahren zur Benzingewinnung (Kohleverflüssigung)
Haber-Bosch-Verfahren (Gewinnung von reinem Stickstoff aus der Luft) wird in die Großindustrie eingeführt; Azetatkunstseide wird fabrikmäßig hergestellt
- 1915 *Junkers* baut das erste Ganzmetallflugzeug

- 1917 Die Große Sozialistische Oktoberrevolution hebt das Privateigentum an Produktionsmitteln im ehemaligen Rußland auf
- 1919 *Rutherford* gelingt erste Atomumwandlung
- 1920 Erster Rundfunksender eröffnet (Pittsburgh)
Erstes vollständig geschweißtes Seeschiff in England erbaut
- 1922 *Fischer-Tropsch*-Verfahren zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen (Benzin u. a.)
- 1923/24 Erste Transferstraße in England errichtet
- 1924 Vollmechanisierte Abraumförderbrücke im Braunkohlenbergbau verwendet
- 1925 Die deutsche chemische Industrie im IG-Farben-Trust zusammengefaßt
- 1926 Synthetisches Vitamin hergestellt
Synthetischer Kautschuk (Buna) hergestellt
- 1927 Bau des Dnjeprkraftwerkes
- 1928 Penicillin entdeckt
Erstmalige Schallaufzeichnung auf Magnettonband
- 1930 Neutronenstrahlung entdeckt (*Joliot-Curie*)
Strahltriebwerk entwickelt (*Schmidt-Rohr*)
- 1930/31 Untersuchungen zu Größe und Bau von Makromolekülen schaffen theoretische Grundlage für Entwicklung von Kunststoff (*Staudinger*)
- 1933 Fernsehen erreicht durch Benutzung der Bildwandler- und Kathodenstrahlröhre Betriebsreife
- 1934 Radarsystem erfunden
Künstliche Erzeugung der Radioaktivität
- 1935 *Stachanow* fördert achtfache Norm Steinkohle
- 1936 Erster Farbtonfilm aufgeführt
- 1937 *Otto Hahn* gelingt die Zertrümmerung von Uranatomen
Erster Hubschrauberfreiflug (*Focke*)
Düsenmotor in England konstruiert
- Hydromechanischer Abbau der Kohle (SU)
- 1936/38 Erste Polyamidfasern entdeckt
- 1939 Erste Transferstraße in der Sowjetunion
- 1939/41 Erste programmgesteuerte Relaisrechenmaschine
- 1940 Kohlekombines zur Mechanisierung des Abbaus vor Ort eingesetzt
- 1942 Erste Energiegewinnung durch Atomzertrümmerung (Kettenreaktion)
- 1944 Düsenflugzeuge erreichen Geschwindigkeit von 1000 km/h

Im Mittelpunkt der jüngsten Entwicklungsphase der modernen Produktivkräfte steht der wissenschaftlich-technische Fortschritt, der – mit den Vorzügen einer sozialistischen Wirtschaft verbunden – zu einer raschen Entwicklung der sozialistischen Gesellschaft beiträgt. Diese Entwicklungsphase wird im wesentlichen gekennzeichnet erstens dadurch, daß die Wissenschaft zum immanenten Bestandteil der Produktion wird, zweitens durch Ausnutzung neuer Energieformen (Atomenergie) und Arbeitsgegenstände (Kunstfasern, Kunststoffe) und drittens durch weitgehende Anwendung automatischer Produktionsmethoden. Letztere bestehen in der Übernahme der repetitiven Arbeitsgänge durch die Maschine bei gleichzeitiger Ausübung der Kontrollfunktionen durch elektromagnetische, elektronische oder pneumatische Steuer- und Regeleinrichtungen. Damit geht einher eine generelle Umwandlung der herkömmlichen Technologie (Fließfertigung) und die Herausbildung der viergliedrigen Arbeitsmaschine – Antriebsmaschine, Transmission, Arbeitsmaschine, Steuer- und Regleinrichtung (Einzelmaschine) – ganzer automatischer Maschinensysteme (Transfer- bzw. Taktstraßen) und schließlich vollautomatischer Fabriken. Daraus erklärt sich die vorrangige Stellung der chemischen Industrie (Kunststoffe, Petrochemie), der Elektroindustrie (Elektronik, Rechenautomaten), der Energieerzeugung und des Maschinenbaues. In engstem Zusammenhang damit

entwickeln sich neue Organisationsmethoden und -formen des Produktionsprozesses. Die durch den wissenschaftlich-technischen Fortschritt geschaffenen Produktivkräfte bilden ihrem eigentlichen Charakter nach die materiell-technische Basis der kommunistischen Gesellschaft.

- 1945 Elektronenrechenmaschine gebaut (IBM)
- 1946 Internationale Patentierung der elektroerosiven Metallbearbeitung (Gebr. *Lazarenko*, Sowjetunion)
- 1947 Erstmalige Überschreitung der Schallgeschwindigkeit durch ein Flugzeug (USA)
- 1948 Streckenvortriebsmaschine im Kalibergbau
Norbert Wieners „Cybernetics“ erscheint
- ab 1948 Benutzung radioaktiver Stoffe in der Chemie
- 1949 Raketengeschoss erreicht 412 km Höhe
Erster Nonstopflug um die Erde
Erste erfolgreiche Verwendung von Transistoren
- 1950 Erste Farbfernsehübertragung in Amerika
Vollautomatische Herstellung von Automobilkolben (Sowjetunion)
Unbemanntes Raketenflugzeug erreicht mehrfache Schallgeschwindigkeit (3000 km/h)
Die Produktion von Polyakrylnitrilfasern (z. B. *Orlon*) beginnt (USA)
- 1952 Großtechnische Anwendung des Sauerstoffs zur Stahlerzeugung (L-D-Verfahren, Österreich)
- 1953 Erste Anwendung der Elektronenrechenmaschine für Büroarbeit
Beginn der Halbleiterherstellung
Alle Unternehmen in den Schlüsselindustrien der USA haben sich eigene Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen angegliedert
- 1953/54 Die Welterzeugung von Kunststoffen überschreitet 2 Millionen Tonnen
- 1954 Erstes Atomunterseeboot (USA)
Erstes Atomkraftwerk (SU)

Erste Sprachübersetzung russisch-englisch durch Elektronenrechenmaschine (IBM)

Entdeckung des Maserprinzips (Sowjetunion und USA)

Das Malimo-Verfahren erreicht Betriebsreife (DDR)

1955 Erste vollautomatische Fabrik (Sowjetunion)

Herstellung von profilierten synthetischen Fasern (DDR)

1956 Die Produktion von Polymerisationsprodukten weitet sich stark aus
Kristalline Kunststoffe besonderer Festigkeit hergestellt
Die Richtlinien zum 6. Fünfjahrplan der Sowjetunion (1956–1960) sehen eine starke Steigerung des Baues automatischer und halbautomatischer Maschinen und Maschinenstraßen vor. Die Gesamtzahl der voll ausgebildeten Wissenschaftler und Diplomingenieure beträgt etwa 3 Millionen. Das sind 0,1 % der Gesamtbevölkerung der Welt.

1957 Die Sowjetunion startet den ersten künstlichen Erdsatelliten

Erste erfolgreiche Versuche zur direkten Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie (Sowjetunion und USA)

1957 Erstes nichtmilitärisches, durch Kernenergie angetriebenes Schiff läuft vom Stapel (Sowjetunion)

1958 Entwicklung der Lasertechnik

1959 Erste Fotos der Mondrückseite durch „Lunik 3“
Vollautomatische Schachtförderung im Erzbergbau (DDR)

1960 Thermische Aluminiumherstellung (Kanada, Frankreich)
Verbesserter Elektronenstrahl-Mehrkammerofen zur Herstellung von Metallen mit hohen Reinheitsgraden (DDR)

Erstmalige Beobachtung des Laser-effektes im sichtbaren Licht (USA)

Erstmalige Vorführung eines Drehkolbenmotors (*Wankel* – NSU)

Großproduktion des Skelans (DDR)

- 1960/61 Die Bionik konstituiert sich als eine neue selbständige Wissenschaftsdisziplin
- 1960/61 Übergang zur Mikromodul- und Dünnschichttechnik beim Aufbau elektronischer Geräte
- 1961 Erster bemannter Weltraumflug (*Gagarin*, Sowjetunion)
- 1962 Erste Fernsehübertragung zwischen Europa und Amerika durch Nachrichtensatelliten (USA)
- 1963 Neues ökonomisches System zur Planung und Leitung der Volkswirtschaft in der DDR eingeführt
- 1964 Erste Anwendung eines Plasmatriebwerkes zur Bahnkorrektur von „Sonde 2“ (Sowjetunion)
- 1964 Entwicklung einer programmgesteuerten Werkzeugmaschine, die Werkstücke mit Hilfe eines Laserstrahles bearbeitet, in der Sowjetunion abgeschlossen
- 1965 Erfolgreiches Rendezvousmanöver im Weltraum (USA)
- 1966 Von der Sowjetunion wird die erste automatische Station auf dem Mond gelandet
- 1967 Beginn des regelmäßigen Farbfernsehbetriebes in Europa
Erstes erfolgreiches automatisch gesteuertes Rendezvousmanöver im Weltraum (SU)
- 1969 Erster Mensch auf dem Mond gelandet (USA)
Erstmalige stabile Verschmelzung von Atomkernen (thermonukleare Reaktion) unter irdischen Bedingungen (Dubna, SU)
Beginn der großindustriellen Herstellung von stark eiweißhaltigen Soja-Produkten, die in Aussehen und Geschmack Fleisch, Fisch, Geflügel, Obst usw. gleichen (USA)
- 1969 In der Welt sind 479 Kernreaktoren in Betrieb, die sich auf 15 Länder verteilen
- 1969 Projektierung eines Computers, der die Rechengeschwindigkeit der bisherigen Anlagen um das Tausendfache übertreffen soll (England)
- 1970 Erfolgreiche Erforschung der Mondoberfläche mittels eines automatisch gesteuerten Mondfahrzeuges (Lunochod, SU)
Elektronenmikroskopische Fotografie einzelner Schwermetallatome im Molekülverband (USA)
Synthese des Elements 105 Bohrium (Dubna, SU)
Im Weltmaßstab werden 110600 seriengebaute EDV-Anlagen betrieben
Erster brauchbarer MHD-Generator im Versuchsbetrieb (SU)
- 1971 Komplexprogramm des RGW zur Vertiefung der internationalen sozialistischen Arbeitsteilung
- 1970/73 Erstes prozeßautomatisiertes flexibles Fertigungssystem zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke (Prisma 2, DDR)
- 1973 Im Weltmaßstab werden 100 Kernkraftwerke betrieben
- 1975 Erstes gemeinsames Weltraumprojekt UdSSR–USA (Sojus–Apollo)
Weltproduktion von Chemiefaserstoffen erreicht mit 15,4 Mt 50 Prozent der Weltzeugung an textilen Faserstoffen
- 1977 Atomeisbrecher bezwingt als erstes Überwasserschiff den Nordpol (Arktika, SU)

Inhalt

Vorwort	5	2.2.4. Bemaßung	27
1. Einheiten und Formelzeichen		Elemente der Bemaßung 27 / Allgemeine Regeln 29 / Vorzugszahlen und Vorzugsmaße 29 / Bemaßung von kreis- und kurvenförmigen Konturen 29 / Winkelbemaßung 30 / Kegelverhältnis, Verjüngung, Neigung 31 / Funktionsbedingte Bemaßung 32 / Vereinfachte Bemaßung von Löchern 36	
1.1. Tafel der gesetzlichen Einheiten	7	2.2.5. Oberflächenkennzeichnung und Bearbeitungsangaben	36
1.1.1. Vorbemerkung	7	Oberflächenrauheit 36 / Angabe der Oberflächenrauheit 38 / Eintragungsbeispiele 38	
1.1.2. Vorsätze	8	2.2.6. Werkstoffangaben	40
1.1.3. Basiseinheiten	8	Stoffangaben 40 / Bezeichnung von Werkstoffquerschnitten 40 / Schraffuren zur Kennzeichnung von Werkstoffen 40	
1.1.4. Weitere gesetzliche Einheiten ..	8	2.2.7. Maschinenelemente	41
1.1.5. Einheiten für Spezialgebiete ...	11	Gewindedarstellung 41 / Schrauben 42 / Niete 42 / Stifte 43 / Vereinfachte Darstellung von Verbindungselementen 43 / Keile und Paßfedern 45 / Zug- und Druckfedern 49 / Schweißverbindungen 50 / Zahnradgetriebe 50	
1.2. Allgemeine Formelzeichen nach TGL 0-1304 (Auszug)	11	2.2.8. Zeichnungsarten	54
1.3. Weiterführende Literatur	12	Entwurfszeichnung 54 / Fertigungszeichnung und Stückliste 55 / Fertigungsmittelzeichnung 57 / Aufstellungsplan 57 / Fundamentzeichnung 57 / Angebotszeichnung 57	
2. Technisches Zeichnen		2.3. Technisches Zeichnen für die Holzbearbeitung	57
2.1. Allgemeine Grundlagen	13	2.3.1. Holzarten	57
2.1.1. Ausführung der technischen Zeichnungen	13	2.3.2. Vereinfachte Darstellung von Verbindungselementen	57
Skizzen 13 / Zeichnungen 13 / Vervielfältigungen 14 / Zeichengeräte und Zeichenzubehör 15 / Zeichnungsformate 16 / Zeichnungsschrift 18 / Beschriftung 18 / Linien 18 / Maßstäbe 18		2.3.3. Schnittdarstellungen	58
2.1.2. Hauptverfahren der Darstellung von Gegenständen	20	Schraffuren und Symbole 58 / Verschiedene Kennzeichnungen 59	
Axonometrische Projektion 20 / Rechtwinklige Parallelprojektion 21 / Sinnbildliche Darstellung 22		2.3.4. Gesamtzeichnung	61
2.2. Technisches Zeichnen im Maschinenbau	23	2.4. Technisches Zeichnen in der Elektrotechnik	61
2.2.1. Werkstücke mit prismatischer Grundform	23	2.4.1. Darstellungsweise	61
2.2.2. Werkstücke mit runder Grundform	24		
2.2.3. Schnittdarstellungen	25		

2.4.2. Schaltpläne	62	4.3. Die thermischen Zustandsgrößen und ihre Beziehungen zueinander	105
Übersichtsschaltplan 64 / Netzplan 64 / Installationsplan 64 / Stromlaufplan 64 / Bauschaltplan 64		4.3.1. Die thermischen Zustandsgrößen	105
2.5. Weiterführende Literatur	70	4.3.2. Die isotherme Zustandsgleichung	105
2.5.1. Bücher	70	4.3.3. Die isobare Zustandsgleichung	106
2.5.2. Verzeichnis wichtiger Standards	70	4.3.4. Die isochore Zustandsgleichung	106
		4.3.5. Die Zustandsgleichung der idealen Gase	106
3. Technische Mechanik		4.3.6. Die allgemeine thermische Zustandsgleichung	107
3.1. Mechanik starrer Körper	73	4.4. Die kalorischen Zustandsgrößen und ihre Funktion bei wärmetechnischen Prozessen	107
3.1.1. Grundlagen	73	4.4.1. Spezifische Wärme und innere Energie	108
Kräfte und ihre Darstellung 73 / Grundgesetze der Mechanik 74 / Zentrale ebene Kraftsysteme 74 / Allgemeine ebene Kraftsysteme 76 / Zentrale räumliche Kraftsysteme 80		4.4.2. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (2. Form)	108
3.1.2. Statik	80	4.4.3. Adiabatische Zustandsänderung	109
Äußere und innere Kräfte 80 / Träger auf zwei Stützen 82 / Einseitig eingespannte Träger 83 / Einfache Fachwerke 84 / Weitere Tragwerke 86 / Schwerpunkt 87 / Standsicherheit 89		4.4.4. Technische Arbeit durch Zustandsänderung	111
3.1.3. Kinematik und Dynamik	89	4.4.5. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (3. Form)	113
Grundbegriffe 89 / Parallelogramm der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wege 90 / Diagramme 91 / Translation und Rotation 91 / Bewegungen von Massen 92 / Zusammenstellung der wichtigsten Formeln zur Translation und Rotation 93 / Reibung 94		4.5. Reversible und irreversible Vorgänge	113
3.2. Festigkeitslehre	96	4.6. Kreisprozesse	114
3.2.1. Grundlagen	96	4.7. Wärmeübertragung	118
Aufgaben 96 / Beanspruchung und Spannung 96 / Festigkeitsgrenzen 97 / Zulässige Spannung und Sicherheit 98		4.8. Weiterführende Literatur	118
3.2.2. Formänderung und Spannung	98	5. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung	
Dehnung und Spannung 98 / Biegung und Spannung 98 / Zugbeanspruchung 100 / Druckbeanspruchung und Flächenpressung 100 / Knickbeanspruchung 101 / Gerade Biegebeanspruchung 102 / Scherbeanspruchung 102 / Verdreh- oder Torsionsbeanspruchung 102 / Zusammengesetzte Beanspruchung 103 / Biegelinie 103		5.1. Metallische Werkstoffe	119
3.3. Weiterführende Literatur	103	5.1.1. Grundlagen der allgemeinen Metallkunde	119
4. Technische Wärmelehre (Grundlagen)		Einteilung der Metalle 119 / Der kristalline Aufbau der Metalle 119 / Einfluß der Temperatur auf den Zustand reiner Metalle 122 / Einiges über Zweistofflegierungen 123 / Einfluß von Verarbeitungsverfahren auf metallische Werkstoffe 127 / Korrosion und Oberflächenschutz metallischer Werkstoffe 130	
4.1. Vorbemerkungen	104	5.1.2. Eisenwerkstoffe	134
4.2. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (1. Form)	105	Zur Gewinnung der Eisenwerkstoffe 134 / Eisen-Kohlenstoff-Legierungen und ihr Umwandungsverhalten 135 / Zähigkeitseigenschaften der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen 138 / Zur Wirkung von Zusatzelementen auf die Stahleigenschaften 139 / Einteilung der Stähle nach ihrem Verwendungszweck 139 / Gegossene Eisenwerkstoffe 141	

5.1.3.	Nichteisenmetalle.....	142	6.2.4.	Bauelemente zur Fortleitung mechanischer Energie	183
	Aluminium und Aluminiumlegierungen 142 / Kupfer und Kupferlegierungen 143			Fortleitung von Zugkräften 183 / Fortleitung von Druckkräften 184 / Fortleitung von Drehmomenten 184	
5.2.	Nichtmetallische Werkstoffe ..	146	6.2.5.	Bauteile zum Umformen mechanischer Energie.....	186
5.2.1.	Plaste und Elaste.....	146	6.2.6.	Bauteile zum Speichern mechanischer Energie.....	189
	Allgemeines 146 / Gemeinsame Eigenschaften 146 / Verwendung 146 / Eigenschaften wichtiger Massenplaste 147 / Silikone 148 / Gummi 148		6.2.7.	Bauteile zum Schalten und Regeln des mechanischen Energieflusses	191
5.2.2.	Holz	150	6.2.8.	Bauteile als Widerstände im mechanischen Energiefluß....	194
5.2.3.	Keramik	151	6.2.9.	Bauteile als Stoffträger und Träger für Arbeitsorgane.....	194
	Allgemeines 151 / Grobkeramik 151 / Feinkeramik 152		6.2.10.	Baugruppen	195
5.3.	Werkstoffprüfung.....	153	6.3.	Maschinen im Produktionsprozeß	195
5.3.1.	Allgemeines.....	153	6.3.1.	Einteilung der Maschinen nach ihrem Einsatz in den technologischen Prozessen	196
5.3.2.	Mechanische Prüfverfahren ...	153	6.3.2.	Maschinen zur Durchführung der Energieumwandlungsprozesse ..	196
	Statische Festigkeitsprüfungen 153 / Dynamische Prüfverfahren 158			Maschinen zur Umformung mechanischer Energie 196 / Maschinen zur Umwandlung thermischer in mechanische Energie 200 / Maschinen zur Umwandlung chemischer in mechanische Energie 201	
5.3.3.	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	159	6.3.3.	Maschinen zur Durchführung der Stoffumformungsprozesse..	203
	Allgemeines 159 / Durchstrahlungsverfahren 159 / Magnetpulverprüfung 160 / Ultraschallprüfung 160			Maschinen zum Stoffzubereiten 203 / Maschinen zum Urformen 204 / Maschinen zum Umformen 205 / Maschinen zum Trennen 206 / Maschinen zum Fügen und Verbinden 208 / Maschinen zum Beschichten 208	
5.3.4.	Technologische Prüfverfahren .	160	6.3.4.	Maschinen zur Durchführung der Transportprozesse	209
5.3.5.	Schnellprüfverfahren zur Werkstoffidentifizierung	161		Hebezeuge und -maschinen 209 / Förderer für Schütt- und Stückgut 209 / Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten 210 / Maschinen zum Fördern und Verdichten von Gasen 210	
	Schleiffunktenanalyse 161 / Täpfelanalyse 161 / Bestimmung der Plastart 161		6.3.5.	Maschinen zur Durchführung der Stoffumwandlungsprozesse	210
5.4.	Ökonomischer Materialeinsatz	161	6.3.6.	Maschinen zur Durchführung der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse	211
5.5.	Standards für Werkstoffe und Werkstoffprüfung	163		Landmaschinen für den Feldbau 211 / Maschinen und Geräte für die Innenwirtschaft 212	
5.6.	Weiterführende Literatur	164			
6.	Maschinenlehre				
6.1.	Maschinentheorie	166			
6.1.1.	Wesen der Maschine	166			
6.1.2.	Einteilung der Maschinen	167			
6.1.3.	Maschinenanalyse	168			
	Grundbegriffe der Maschinenanalyse 168 / Aufbau der Maschine 169 / Zusammenwirken von Bauteilen und Baugruppen in Maschinen 171				
6.2.	Bauelemente und Bauteile ...	174			
6.2.1.	Einteilung der Bauelemente und Bauteile	174			
6.2.2.	Bauelemente zum Abstützen von Bauteilen	175			
	Maschinengestelle 175 / Träger 175 / Achsen 176 / Zapfen 176 / Lager 177 / Führungen 178				
6.2.3.	Bauelemente zum Verbinden von Bauteilen	178			
	Stoffschlüssige Verbindungen 178 / Formschlüssige Verbindungen 180 / Kraftschlüssige Verbindungen 182				

6.3.7. Maschinen zur Durchführung der Informationen verarbeitenden Prozesse	212
Maschinen zum Weiterleiten von Informationen 212 / Maschinen zum Speichern von Informationen 212 / Maschinen zum Verarbeiten von Informationen 212	
6.3.8. Maschinen in der automatisierten Produktion	213
6.4. Quellennachweis und weiterführende Literatur	214
7. Elektrotechnik	
7.1. Grundlagen der Elektrotechnik .	216
7.1.1. Vom Wesen der Elektrizität ...	216
7.1.2. Elektrische Größen und ihr Zusammenhang	217
Stromstärke 217 / Spannung 217 / Widerstand 217 / Elektrische Energie 217 / Elektrische Leistung 218	
7.1.3. Berechnungen an Stromkreisen .	218
7.1.4. Elektrisches Feld	220
7.1.5. Magnetismus	221
Magnetfluß 221 / Magnetische Spannung 221 / Magnetischer Widerstand 221 / Gesetze am magnetischen Kreis 222 / Magnetisches Feld 222	
7.1.6. Induktion	222
Selbstinduktion 223	
7.1.7. Wechselstrom	224
Zeigerdarstellung 224 / Komplexe Rechnung mit Wechselstromgrößen 225 / Schaltelemente im Wechselstromkreis 225 / Anwendung der Rechnung mit komplexen Größen auf Wechselstromkreise 225 / Leistung bei Wechselstrom 227 / Drehstrom 228 / Dreieckschaltung 228 / Sternschaltung 228	
7.1.8. Messen elektrischer Größen	228
Vorbemerkung 228 / Typen von Meßwerken 229 / Verwendung der Meßwerke 230	
7.2. Elemente der Leistungselektrik	232
7.2.1. Erzeugung elektrischer Energie	232
Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie 232 / Umkehrbare Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie 233 / Weitere Spannungsquellen 233 / Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie durch Induktion 234 / Gleichstromgeneratoren 235 / Wechselstromgeneratoren 236	

7.2.2. Fortleitung elektrischer Energie	237
Transformatoren 238 / Umformer 239 / Gleichrichter 239 / Schalt- und Sicherungsgeräte 242 / Leitungen 244	
7.2.3. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen ...	246
Umwandlung in Wärmeenergie 246 / Umwandlung in chemische Energie 247 / Umwandlung in Licht 248 / Umwandlung in mechanische Energie 248 / Gleichstrommotoren 248 / Wechselstrommotoren 251	
7.2.4. Verstärkung elektrischer Energie	256
7.3. Elemente der Informationselektrik	257
7.3.1. Informationswandler	257
Mikrofon (akusto-elektrischer Informationswandler) 258 / Bildaufnahmehöhen (optisch-elektrische Informationswandler) 260 / Schallsender (elektro-akustische Informationswandler) 261 / Elektronenstrahlröhren 262	
7.3.2. Verstärker	264
Relais 264 / Elektronenröhren 266 / Transistoren 268 / Verstärker mit Röhren und Transistoren 270	
7.3.3. Schwingungserzeuger	274
7.3.4. Modulation — Demodulation ...	277
Modulation 277 / Demodulation 280	
7.3.5. Informationskanal	281
Übertragung durch Freileitungen 281 / Übertragung durch Kabel 281	
7.3.6. Stromversorgung	283
7.3.7. Abschließende Betrachtung	284
7.4. Weiterführende Literatur	285
8. Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik	
8.1. Vorbemerkung	287
8.2. Steuern und Regeln	288
8.3. Signale	289
8.3.1. Signal, Informationsparameter, Signalträger	289
8.3.2. Einteilung der Signale	290
8.4. Glieder	290
8.4.1. Definition und allgemeine Eigenschaften	290
8.4.2. Analoge Glieder	291
Definition 291 / Statische Kennlinie, Grundtypen 291 / Übergangsfunktion 292 / Grundtypen von linearen Gliedern und ihre Übergangsfunktionen 293 / Frequenzgang, Ortskurve, Frequenzkennlinie 295	

8.4.3. Rechenglieder	295
8.4.4. Diskrete Übertragungsglieder und ihre Eigenschaften	296
Definition 296 / Binäre Übertragungs- glieder 296 / Mehrpunkt- und nichtlineare Glieder 297	
8.4.5. Diskontinuierliche Glieder	298
8.4.6. Torglieder	298
8.5. Signalfluß bei der Zusammen- schaltung von Gliedern	298
8.5.1. Zusammenschaltung analoger Glieder	299
Signalverzweigung 299 / Additionsstellen 299 / Multiplikations- und Divisionsstellen 299 / Reihenschaltung analoger Übertra- gungsglieder 300 / Parallelschaltung ana- loger Übertragungsglieder 301 / Rückführ- schaltung 302	
8.5.2. Zusammenschaltung binärer Glieder (Schaltalgebra)	304
8.6. Meß-, Steuer- und Regelgeräte ..	305
8.6.1. Betriebsmeßtechnik	305
Wesen der Betriebsmeßtechnik 305 / Ausschlagverfahren, Kompensationsver- fahren 306 / Aufbau einer Meßeinrich- tung 307	
8.6.2. Meßanordnungen	307
Messung elektrischer Größen 307 / Messung von Wegen (Verschiebungen) und Winkeln 308 / Kraftmessung 309 / Druckmessung 309 / Durchfluß- und Mengenmessung 311 / Temperaturmessung 311 / Füllstandmes- sung 313 / Gasanalyse 313 / Drehzahlmes- sung 313	
8.6.3. Einstellglieder	315
8.6.4. Verstärker	315
Pneumatische Verstärker 315 / Hydrau- lische Verstärker 316	
8.6.5. Steuergeräte	316
8.6.6. Regler	317
8.6.7. Rechengeräte	318
8.6.8. Stalleinrichtungen	318
8.7. Steuerungstechnik	319
8.7.1. Allgemeine Begriffe der Steue- rungstechnik	319
8.7.2. Zeitplansteuerung	319
8.7.3. Führungssteuerung	320
8.7.4. Ablaufsteuerung	320
8.7.5. Gesteuerte Werkzeugmaschinen ..	321
8.7.6. Lehrmaschinen	321
8.8. Regelungstechnik	322
8.8.1. Einige Grundlagen der Rege- lungstechnik	322

8.8.2. Regelungen ohne Hilfsenergie ..	323
8.8.3. Elektronische Spannungs- und Stromstabilisierung	323
8.8.4. Durchflußregelung	324
8.8.5. Drehzahlregelung	325
8.8.6. Folgeregelung	325
8.8.7. Zeitplanregelung	326
8.8.8. Regelung einer Destillations- kolonne	326
8.8.9. Einsatz von Rechnern	326
8.9. Weiterführende Literatur	328

9. Grundbegriffe der mechanischen Technologie

9.1. Fertigungstechnik – Fertigungs- verfahren	330
9.1.1. Allgemeine Charakteristik der Fertigungstechnik	330
9.1.2. Wirtschaftlichkeit und Ent- wicklung von Fertigungsverfahren	332
9.2. Hauptverfahrensgruppen und Fertigungsverfahren der Ferti- gungstechnik	333
9.2.1. Ordnung der Fertigungsverfah- ren	333
9.2.2. Urformen	335
Merkmale und Einteilung 335 / Charakte- ristische Merkmale wichtiger Gießverfah- ren 336 / Pressen und Sintern von Metall- pulvern 339	
9.2.3. Umformen	339
Merkmale und Einteilung 339 / Techno- logische Erfordernisse der Umformung 339 / Charakteristische Merkmale wichtiger Um- formverfahren 341	
9.2.4. Trennen	345
Merkmale und Einteilung 345 / Charakte- ristische Merkmale wichtiger Trennver- fahren 346	
9.2.5. Fügen	353
Merkmale und Einteilung 353 / Charakte- ristische Merkmale wichtiger Schweißver- fahren 355	
9.2.6. Beschichten	360
Merkmale und Einteilung 360 / Charakte- ristische Merkmale ausgewählter Be- schichtungsverfahren 361	

9.2.7. Stoffeigenschaftändern	364	10.8. Vorzugszahlen	380
Merkmale und Einteilung 364 / Charakteristische Merkmale ausgewählter Verfahren 364		10.9. Erreichter Entwicklungsstand und Ausblick	381
9.3. Weiterführende Literatur	367	10.10. Quellen und weiterführende Literatur	383
 10. Standardisierung		 Anhang	
10.1. Begriffe und Arten von Standards	368	11. Ausgewählte ökonomische Statistiken	384
10.2. Aufgaben der Standardisierung	372	12. Zeittafel zur Entwicklung der modernen Produktivkräfte ...	389
10.3. Grundsätze der Standardisierung	374	Register	401
10.4. Hemmnisse	376		
10.5. Organe und Planung	377		
10.6. Ausarbeitung und Einsatz	377		
10.7. Dezimalklassifikation	380		

Register

(zu den Abschnitten 1 bis 10)

- Abbreinstumpfschweißen 359
- Ablaufsteuerung 320
- Abschreckalterung 139
- Absperrhahn 193
- Absperrschieber 193
- Absperrventil 193
- Abstreckziehen 343
- Abtragen 351
 - durch elektroerosive Bearbeitung 352
 - durch Elektronenstrahlbearbeitung 352
 - durch Elysieren 353
 - durch Laser-Verfahren 351
- Achsen 176
- Adiabate 110
- Akkumulator 232
- Alitieren 361
- Alpolige Darstellung 63, 67
- Aloxid-Verfahren 369
- Altern 366
- Aluminium 126 f., 131 f., 139, 142 ff.
 - bronzen 145
 - legierungen 126, 142 ff.
 - Magnesium-Legierungen 131
- Ampere 8
- Angebotszeichnung 57
- Ängström 11
- Anlagenprojektion 13
- Anlassen 364
- Anpassungsorgane 170
- Ansichten, Anordnung 22
- Antimon 124, 128
- Antriebsorgane 170
- Arbeit 89 ff., 94
 - , technische 112
- Arbeitsmaschinen 167
- Arbeitsorgane 170
- Arcatom-Schweißverfahren 357 f.
- Aristoteles 304
- Asynchronmotoren 253
- Atmosphäre, technische 10
 - , physikalische 10
- Audio 280
- Auflager 80 f.
- Aufnahmeskizze 13
- Aufstellungsplan 57
- Aushärten 126, 366
- Ausschlagverfahren der Meßtechnik 306
- Automatisierung 213, 372
- Axialpumpe 210
- Backenbrecher 203
- Backenbremse 194
- Bandbremse 194
- Bändchenmikrofon 259
- Barkhausensche Röhrengleichung 266
- Bauelemente des Maschinenbaus 174
 - zum Abstützen 175 ff.
 - zum Fortleiten mechanischer Energie 183
 - zum Verbinden 178
- Bauglieder der Regelungstechnik siehe Glieder
- Baugruppen 195
- Baueinheitenprinzip 375
- Baueinheitensystem 195
- Bar 10
- Bauschaltplan 64
- Baustahl 139
- Bauteile des Maschinenbaus 174
 - als Stoffträger 194
 - als Träger der Arbeitsorgane 194
- Bauteile im mechanischen Energiefluß
 - zum Regeln 191 f.
 - zum Schalten 191
 - zum Speichern 189
 - zum Umformen 186
- Bearbeitungsangaben 35
- Belastungen 80
- Belastungen, ruhende 96
 - , schwellende 96
 - , wechselnde 96
- Beleuchtungsstärke 12
- Bemaßung 27 ff.
- Beschaffenheitsstandards 369
- Beschichten 334, 360
- Beschichtungsverfahren, Übersicht 362 f.
- Beschleunigung 9, 90 ff.
- Bewegung
 - , beschleunigte 93
 - , geradlinige 92
 - , gleichförmige 93
 - , kreisförmige 92
 - von Massen 92
 - , zusammengesetzte 91
- Biegebeanspruchung 96, 102
- Biegelinie 103
- Biegemoment 82
 - , maximales 82
- Biegen 343
- Biegeversuch 155
- Bildaufnahmehöhen 260
- Bildröhren 264
- Blattfedern 190 f.
- Blechumformung 339
- Blei 120, 123, 131
- Bleibronzen 144 f.
- Blindwiderstand 12
- Blockguß 127
- Bolzenkupplungen 192
- Boole 304
- Boolesche Algebra 304
- Boyle-Mariotte, Gesetz von 106, 200
- Boyle, R. 105
- Breitbandverstärker 271
- Bremsregler 194
- Brinellhärteprüfung 157
- Bruchlinien 28
- Buckelschweißen 359
- Calit 152
- Candela 8, 11
- Carnot 114
- Carnotscher Kreisprozeß 114
- Celsius-Temperatur 7, 12
- Chrom 131, 139
- Clausius 105, 115
- Clausius 115
- Clausius-Rankine-Prozeß 116
- CO₂-Schweißverfahren 357
- CO₂-Wasserglasverfahren 336
- Coulomb 11
- Coulombsches Reibungsgesetz 95

- Cremonaplan* 85
Culmannsche Hilfsgerade 80
- Dampfmaschine** 116
 Darstellung, sinnbildliche 22
 Dauerschwingversuch 158
 Dauerfestigkeit 97
 Dehnung 12, 98
 Demodulation 277, 280
 Dezimalklassifikation 380
 Dichte 12
 Dielektrizitätskonstante 12, 220
Dieselhorst-Martin-Vierer
 (Kabel) 281
Dieselmotor 116
 Diffusionsverfahren zur Oberflächenveredlung 361
 Doppelbackenbremse 194
 Doppelkurbel 188
 Doppelschlußgenerator 235
 Doppelschlußmotor 250 f.
 Doppelschwinge 188
 Dreheisenmeßwerk 229
 Drehmoment 78
 —, Fortleitung 184
 Drehspulmeßwerk 228
 Drehstrom 227
 Drehstrommotor 249
 Drehstrom-Nebenschlußmotor 251
 Drehstrom-Reihenschlußmotor 251
 Drehzahlregelung 325
 Drehzahlregler 194
 Dreieckschaltung 228, 238
 Dreieck, unverschiebbares 84
 Dreigelenkbogen 87
 Dreigelenkrahmen 87
 Dreiphasen-Brücken-Schaltung 240
 Druck 10
 —beanspruchung 96, 100
 —feder 49, 191
 —guß 338
 —gießmaschine 204
 —kabel 246
 —kessel 191
 —kraft 84
 —kraft, Fortleitung 184
 —spannung 100
 —versuch 156
 Drücken 342
 Durchflußregelung 324
 Durchstrahlungsverfahren zur Werkstoffprüfung 159
 Duropaste 146 f.
 Dynamik 73
 Dynepak-Verfahren 345
- Einphasen-Brücken-Schaltung** 240
Einphasen-Einweg-Schaltung 240
Einphasen-Reihenschlußmotor 251, 256
Einphasen-Repulsionsmotor 256
- Einpolige Darstellung** 67
Einsatzstahl 140
Einzelkraft 73
Eisen 120 f.
 —, α 120 ff., 135 f.
 —, γ 120 ff., 135 f.
 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen 135 ff.
 Eisenwerkstoffe, Gewinnung 134
 Elaste 146
 Elastizitätsgrenze 97, 128
 Elastizitätsmodul 12, 98, 156
 Elektrizität 216
 Elektrizitätsmenge 11f.
 Elektrodynamometer 229
 Elektroerosion 352
 Elektrofunkenbearbeitung 352
 Elektrolyse 247
 Elektrolyt 247
 Elektronenröhren 266
 Elektronenstrahloszillograph 263
 Elektronenstrahlröhren 262
 Elektronenstrahlsschweißen 360
 Elektronenvolt 11
 Elektroschlacke-Schweißen 357
 Elektrostahlverfahren 134
 Element, galvanisches 232
 Elysieren 353
 Energie 12, 90
 —, elektrische 217, 246
 —, elektrische, Erzeugung 232
 —, elektrische, Fortleitung 237
 —, kinetische 90, 94
 —, innere 108f.
 —, mechanische 90, 105
 —, potentielle 90, 94
 Energieäquivalente 200
 Energiemaschinen 167, 195 ff.
 Enthalpie 107, 113
 Entropie 12, 107, 115
 Entwurfskizze 13
 Entwurfzeichnung 54
 Epoxidharz 147
 Erg 10
 Ersatzschaltbild 219
Escher-Wyss-Prozeß 116
Euler, Berechnungsverfahren nach 102
Eulersche Schnitthypothese 80
 Eutektikum 125, 136
 Eutektoid 136
 Expansionsschalter 243
 Explosivverfahren der Umformung 344f.
- Fachwerke, einfache ebene** 84
Fachbereichstandards 369
Fallbeschleunigung 12
Farad 220
Faraday 220
Farbanstriche 363
- Faser, neutrale** 80, 98
Federn 190
Federverbindungen 181
Feinguß 338
Feld, elektrisches 220
Feld, magnetisches 222
Feldstärke, elektrische 12
Feldstärke, magnetische 12
Ferrit 135 f.
Fertigungsmittelzeichnung 57
Fertigungstechnik 330 ff.
Fertigungsverfahren, Ordnung 333 ff.
Fertigungszeichnung 55
Festigkeitsgrenzen 97
Festigkeitslehre 96
Festigkeitsprüfung, dynamische 158
 —, statische 153
Filmpositivverfahren 14
Fläche 8
Flächenkraft 73
Flächenpressung 101
Flächenträgheitsmoment, axiales 99
Flächentransistor 269
Flammenhärten 365
Flaschenzug 209
Fliehkraftkupplung 193
Fliehkraftregler 194
Fließeindrücken 342 f.
Fließpressen 342
Flügelpumpe 210
Flüssigkeitsreibung 94
Flüssigkeitsthermometer 312
Folglied 296, 304
Folgeregelung 325
Formabweichungen, zeichnerische Darstellung 32
Formangaben, Bezeichnung von Werkstoffquerschnitten 40
Formelzeichen, standardisierte 11
Formguß 127
Formkokillenguß 338
Fotomodellprojektierung 11
Francisturbine 199
Freiformschmieden 341
Freileitungen 281
Freileitungsseile 244
Frequenz 9, 12, 224
Friedrich, W. 121
Fügen 334, 354
Fügen, Übersicht 354
Führungen 178
Führungssteuerung 320
Fundamentzeichnung 57
- Galvanische Verfahren** 361
Galvanoplastik 334
Gase, ideale 107
 —, reale 107
 —, Zustandsgleichung 106

- Gaskonstante 12
 —, universelle 107
 —, spezielle 107
 Gasschmelzschweißen 358
 Gasschweißen 50
 Gasmaschine 116
 Gasthermometer 312
 Gasturbine 116
 Gauß 222
 Gay-Lussac, J. L. 106
 —, Gesetz von 106, 200
 Gegenverbundgenerator 236
 Gegenwirkungsgesetz 74
 Gelenkträger 86
 Generator 234
 —, eigenregt 234
 —, fremderregt 234
 —, selbstregt 234
 Germanium 268
 Gesamtzeichnung 55
 Gesamtzeichnung der Holzindustrie 60
 Geschwindigkeit 9, 12, 91, 93
 Gesenkschmieden 341
 Getriebe 187
 Gewicht 90
 Gewinde, Kurzbezeichnungen 44
 —, Vorzugsgrößen 44
 —, zeichnerische Darstellung 41
 Gewindewalzen 342
 Gießen 127, 335
 Gießverfahren, Ordnung 335
 Gitter siehe Kristallgitter
 Gleichgewicht von Kräften 76, 79
 Gleichrichter 239
 Gleichstromgenerator 235
 Gleichstrommotor 248
 Gleichstrom-Doppelschlußmotor 251
 Gleichstrom-Nebenschlußmotor 250
 Gleichstrom-Reihenschlußmotor 250
 Gleitlager 178
 Gleitreibung 95
 Glied 290 ff.
 —, analoges 291
 —, binäres 296
 —, D- 292, 295
 —, diskretes 296
 —, diskontinuierliches 298
 —, I- 292, 295
 —, kontinuierliches 291
 —, lineares 293
 —, logisches 296
 —, NICHT- 296, 304
 —, nichtlineares 297
 —, ODER- 296, 304
 —, P- 292, 295
 —, stetiges 291
 —, T- 293
 —, UND- 296, 304
 —, unstetiges 291
 —, Zusammenschaltung 304
 Glühen 364
 Gold 131
 Graetz-Schaltung 240
 Grauguß 142
 Gruppenzeichnung 55
 Grundgesetze der Mechanik 74
 Gummi 148
 Gummischeibenkupplung 186
 Guß-Aluminiumbronze 144
 Guß-Bleibronze 144
 Gußeisen 142
 —, graues 142
 —, weißes 142
 Gußmessing 144
 Guß-Zinnbronze 144
 Haftreibung 95
 Halbleiter 268
 Halbleitergleichrichter 239
 Halbschnitte 26
 Halszapfen 176
 Hangabtriebskraft 95
 Härten 364
 — durch Aufkohlung 366
 — durch Nitrieren 366
 Härteprüfverfahren, dynamische 158
 —, statische 157
 Hartmetall 141
 Hartporzellan 152
 Hebel 78
 Hebelarm 78
 Hebezeuge 209
 Henry 11
 Herdfrischverfahren 134
 Hertz 9
 Hexode 267
 HF-Tiegelofen 247
 Hitzdrahtmeßwerk 229
 Hochgeschwindigkeitsumformung 344
 Hochspannungs-Freileitungen 244
 Hohlwellen 184
 Holländer 204
 Holz 150 ff.
 —, Festigkeitseigenschaften 151
 Hookesches Gesetz 98
 Huth-Kühn-Schaltung 275
 Hydrosark-Verfahren 344
 Ikonoskop 260
 Induktion 222
 Induktionshärten 365
 Induktionsmotor 251
 Induktionsofen 134
 Induktivität 11 f., 225
 Informationselektrik 257
 Informationskette 257
 Informationsparameter 289
 Informationswandler 257
 Inkrimieren 361
 Installationsplan 62
 Isobare 110
 Isochore 110
 Isolatoren 217, 220
 Isotherme 111
 Joule 104
 Joule 10
 Joule-Prozeß 116
 Kabel 281
 Kadmium 124 f.
 Kalorie 10
 Kaltpreßschweißen 360
 Kaltverformung 129 f.
 Kaltwalzen 129
 Kammzapfen 177
 Kapazität, elektrische 12, 225
 Kaplansturbinen 199
 Karat 11
 Kardangelenk 186
 Kegelbrecher 203
 Kegelmühle 204
 Kegelrad 53
 Kegelradgetriebe 187
 Kegelzapfen 177
 Keil 45, 48
 Kelvin-Temperatur 7 f.
 Kennlinien der Regelungstechnik 291
 Keramik 151
 Kerbschlagbiegeversuch 159
 Kententrieb 187
 Kienzle 340
 Kilogramm 8
 Kilopond 90
 Kinematik 89
 Kippmoment 89
 Kirchhoffsche Gesetze 218
 Klebverbindungen 180
 Klinskengesperre 194
 Knetlegierungen 145
 Knickbeanspruchung 96, 101
 Knickspannung 101
 Kniehebelpresse 206
 Knoten 11
 Koaxialkabel 282
 Kobalt 120
 Kokillenguß 127, 338
 Kolbenmaschinen 197
 Kompensationsverfahren der Meß-
 technik 231, 306
 Kondensator 220
 Kondensatormikrofon 259
 Kontaktkorrosion 133
 Kontaktmikrofon 259
 Kontaktumformer 239
 Kopfhörer 261
 Körper, starre 73
 —, elastisch-feste 96
 Korrosion 130 ff.
 Kraft 10, 12, 72 ff.

- Kräfte, äußere** 80
 —, **eingeprägte** 73
 —, **innere** 80
Kräftecock 74
Kräftemaßstab 73
Kräftepaar 78
Kräfteparallelogramm 74
Kräfteplan 75
Kraftsystem, allgemeines ebenes 76
 —, **zentrales ebenes** 74
 —, **zentrales räumliches** 80
Krarup-Kabel 282
Kreiselpumpe 210
Kreisprozesse 114
Kreuzschleife 188
Kreuzspulmowerk 230
Kristallgitter
 —, **hexagonales** 121
 —, **kubisch flächenzentriertes** 121
 —, **kubisch raumzentriertes** 121
Kristallisation von Metallen 127 ff.
Kristallisationsgeschwindigkeit 127
Kristallite 128
Kristallmikrofon 258
Kugelpapfen 177
Kunststoffpresse 204
Kupfer 120, 131, 143 ff.
 —, **legierungen** 143 ff.
Kupplungen 186, 193 f.
 —, **formschlüssige** 192
 —, **kraftschlüssige** 192
 —, **stoffschlüssige** 192
Kurbelgetriebe 188
Kurbelpresse 206
Kurbelscheibenpresse 206
Kurbelschleife 188
Kurbelschwinge 188
Kurvengetriebe 189
Kurvealinea, flexibles 16
Kurzschlußläufermotor 251

Lackieren 363
Lageabweichung, zeichnerische Darstellung 32
Lagenholz 150
Lageplan von Kräften 75
Lager 177
Länge 7
Längskraft 80
Längslager 177
Längskeilverbindung 182
Laserstrahlschweißen 360
Laue, M. v. 121
Lautsprecher 262
Legierungen 123
Leichtmetalle 119
Leistung 10, 12
Leistung, elektrische 218, 227
Leistungselektrik 232 ff.
Leistungsfaktormesser 231
Leistungsschalter 242

Leistungsverstärker 273
Leiter, elektrische 216
Leitwert, elektrischer 11, 12
Leonard-Satz 249, 325
Leuchtdichte 11
Leuchtstoffröhren 248
Lichtbogenofen 134, 246 f.
Lichtbogenschweißen 50, 357
Lichtpausen 14
Lichtstärke 8, 12
Lichtstrom 12
Linienarten 18
Linienkräfte 73
Liquiduslinie 125
Liter 9
Lochleibungsdruck 101
Lötverbindungen 179

Magnesium 120
Magnetfluß 11, 221
Magnetismus 221
Magnetpulverprüfung 160
Magnetverfahren der Umformung 345
Malteserkreuz 193
Mangan 139
Manifer 152
Maniperm 153
Mariotte, E. 105
 —, **Gesetz von** 105 f.
Martensit 137 f.
Maschinen
 —, **Aufbau** 169
 —, **Begriff** 167
 —, **Einteilung** 167
 —, **für den Transport** 209
 —, **im Produktionsprozeß** 195 ff.
 —, **in der automatisierten Produktion** 213
 —, **Informationen verarbeitende** 167, 212
 —, **landwirtschaftliche** 211
 —, **zum Beschichten** 208
 —, **zum Fördern von Gasen** 210
 —, **zum Fügen** 208
 —, **zum Stoffzubereiten** 203
 —, **zum Trennen** 206
 —, **zum Umformen** 205
 —, **zum Urformen** 204
 —, **zum Verbinden** 208
 —, **zur Energieumformung** 196
 —, **zur Stoffumwandlung** 210
Maschinenanalyse 170
Maschinenelemente 170
Maschinengestelle 174
Maschinensystematik 170
Maschinenverfahren 338
Masse 10, 12
Massekabel 245
Massenträgheitsmoment 12
Maßhilfslinien 27

Massivumformung 339
Maßlinien 27
Maßpfelle 27
Maßstäbe 28
Maßzahlen 28
Materialeinsatz, ökonomischer 161 f.
Mayer, R. 104 f.
Mechanik, technische 72 ff.
Mehrpunktglieder 297
Mehrstoffbronzen 144 ff.
Meißer-Oszillator 274
Meßeinrichtung, Aufbau 307
Meßgeräte 305
Messing 131
Messung von Drehzahlen 313 f.
 —, **Druck** 309
 —, **elektrischen Größen** 307, 328
 —, **Füllständen** 331
 —, **Kräften** 309
 —, **Massendurchfluß** 311
 —, **Temperatur** 311
 —, **Volumendurchfluß** 311
 —, **Wegen** 308
 —, **Winkeln** 308
Meßwerke, elektrische 229
Metall-Inert-Gasschweißen 357
Metalle, Dichte 120
 —, **Einteilung** 119
 —, **kristalliner Aufbau** 119 ff.
 —, **reine** 122
 —, **Schmelzpunkt** 120
Metallspritzen 361
Meter 8
MIG-Verfahren 357
Mikrofilmtchnik 15
Mikrofon 258 ff.
 —, **elektrodynamisches** 259
 —, **piezoelektrisches** 259 f.
Mischmaschinen 204
Mischreibung 94 f.
Modulation 277
Modulationsverfahren 279
Molybdän 139
Moment einer Kraft 12, 78
Momentenfläche 82
Momentensatz 78
Muffenkupplung 186

Nahtschweißen 50, 359
Nasenkeile 48
Nebenschlußgenerator 235
Nebenschlußmotor 250
Netzplan 64
Neugrad 9
Neusilber 145
Newton 10
Newtonsche Prinzipien 74
NF-Induktionsofen 247
Nickel 131, 139
Niederspannung 217
Niederspannungskabel 245

- Niederspannungs-Leuchtstoff-
 lampe 248
 Niete 42, 45, 47
 Nietverbindungen 42, 180
 Nitrieren 366
 Norm 369
 Normalbeschleunigung 93
 Normalglühen 138, 374
 Normalkraft 82
 Normalkraftfläche 82 ff.
 Normalspannung 12, 96

 Oberflächenhärten 247
 Oberflächenschutz 130
 Oberflächenrauheit 36 ff.
 Ohm 11
 Ohmmeter 234
 Ohmsches Gesetz 217
 Ölkabel 246
 Ölschalter 242 f.
 Orthikon 260
 Oszillographenröhre 263
 Otto-Motor 116
 Otto-Prozeß 116

 Parallelogramm der Kräfte 74
 — Geschwindigkeiten 90
 — Beschleunigungen 90
 Parallelprojektion, rechtwinklige
 20 ff.
 Parallelresonanzkreis 227
 Parallelschaltung von Induktivitäten
 224
 — Kapazitäten 221
 — Widerständen 219
 Parsec 11
 Pascal 10
 Paßfedern 45, 48
 Passivierung eines Metalls 133
 Paßtoleranzen im System Einheits-
 bohrung 33
 Paßtoleranzen im System Einheits-
 welle 34
 Passungsangaben 32
 Peltonurbine 199
 Pentode 267
 Perlit 135 ff.
 Permeabilität 12, 221
 Pferdestärke 11
 Phase, intermetallische 124
 Phasenrelais 265
 Phenolpreßmassen 146
 Piacryl 147
 Plasmaschmelzschneiden 351
 Plasmastrahlschweißen 360
 Plaste 146 ff.
 Polstrahlen 77
 Polyamide 147
 Polyäthylen 146 f.
 Polyesterharze 146
 Polykondensate 148

 Polymerisate 148
 Polymethacrylat 147
 Polystyrol 147
 Polyurethane 147
 Polyvinylchlorid 146, 147
 Pond 9
 Pressen 205 f.
 Pressen, hydraulische 205
 Preßschweißen 50, 358 f.
 Prinzip von *d'Alambert* 92
 Profilbiegen 344
 Projektion, axonometrische 20 ff.
 —, dimetrische 21
 —, isometrische 21
 —, frontal-dimetrische 21
 Proportionalitätsgrenze 96
 Prüfverfahren, technologische 160
 Pulverbrennschneiden 351
 Pulvermetallurgie 335
 Punktschweißen 50, 359
 Pupinkabel 282
 PVC hart 147
 PVC weich 147

 Quecksilber-Hochdrucklampe 248
 Quecksilberdampf-Gleichrichter 241
 Quecksilberdampf-Stromrichter 241
 Querkraft 82
 Querkraftflächen 82 ff.
 Querlager 178
 Querschnitt, gefährdeter 82

 Radgetriebe 187
 Radiant 9
 Radienschablone 15
 Rauheitsmaß 37
 Raumwinkel 9, 12
 Reaktionskräfte 73
 Realkristalle 122
 Rechengeriäte 318
 Rechenglieder 295
 Reckalterung 139
 Regelgeräte 305, 317
 Regelkreis 289, 323
 Regeln 288 f.
 Regelung, instabile 289
 Regelungstechnik 322 ff.
 Reibbremsen 194
 Reibgesperre 194
 Reibkegelkupplung 192
 Reibradgetriebe 187
 Reibspindelpresse 206
 Reibung 94 ff.
 Reibungsschweißen 360
 Reihensresonanzkreis 227
 Reihenschaltung von Induktivitäten
 223
 — Kapazitäten 221
 — Widerständen 219
 Reihenschlußmotor 248
 Reis, Ph. 257

 Rekristallisationsglühen 130
 Relais 264
 Relais, polarisierte 265
 Resultierende 74
 Richtgesperre 194
 Riementrieb 187
 Rittersches Schnittverfahren 85
 Roheisen 134
 Rohrleitungsschalter 193
 Rollenkupplung 186
 Rollengesperre 194
 Rollennahtschweißen 359
 Rollreibung 96
 Rosten 130
 Rotation 91
 Rotguß 145
 Ruhereibung 95

 Sandformguß 336 f.
 Sandguß 127
 Sauerstoffbrennschneiden 348, 351
 Sauerstoffkorrosion 132
 Schallsender 261
 Schaltalgebra 304
 Schaltgeräte 242
 Schaltkupplungen 191 f.
 Schaltplan 62
 Schaltschütz 242
 Schaltzeichen 61
 Scheibenfedern 49
 Scheibenkupplung 186
 Scherbeanspruchung 96, 102
 Scheren 206
 Scherspannung 12, 102
 Schichtpreßstoffe 146
 Schleiffunkenanalyse 161
 Schleifringläufermotor 253 f.
 Schmelzschweißen 355
 Schmelz-Tauch-Verfahren 361
 Schmieden 341
 Schneckenrad 53
 Schneckenradgetriebe 187
 Schneiden 346
 Schneidkeramik 152
 Schnellarbeitsstahl 141
 Schnittdarstellungen 25 ff.
 Schraffur 40 f., 58
 Schrauben 43 ff.
 Schraubenräder 54
 Schraubenradgetriebe 187
 Schraubverbindungen 181
 Schrift, standardisierte 18
 Schriftfeld 18
 Schrumpfv Verbindung 183
 Schutzgas-Lichtbogenschweißen 50,
 356
 Schweißen 355 ff.
 Schweißtransformator 239
 Schweißverbindungen 50, 178
 —, zeichnerische Darstellung 50 ff.
 Schweißverfahren, Übersicht 356

- Schwermetalle 119
 Schwerpunkt 87
 Schwimmreibung 94
 Schwingungserzeuger 274
 Schwungmasse 190
 Seemelle 11
 Sekunde 8
 Seileckverfahren 77
 Seilstrahlen 77
 Seiltrieb 188
 Selbstinduktion 223
 Selektivverstärker 272
 Sherardisieren 361
 Sicherheit 98
 Sicherungen 243
Siemens, W. v. 235
 Siemens 11
 Signal 289 ff.
 —, analoges 290
 —, binäres 290
 —, digitales 290
 —, diskontinuierliches 290
 —, diskretes 290
 —, kontinuierliches 290
 —, stetiges 290
 —, unstetiges 290
 Signalflußplan 280
 Signalträger 289 f.
 Silber 131
 Silikone 148
 Sintern 127 f.
 Sinteraluminium 143
 Skizze 13
Slavianow-Verfahren 357
 Soliduslinie 124 f.
 Sondermessung 145
 Spanen 347
 Spannung-Dehnung-Diagramm 128, 153
 Spannung der Mechanik 98
 Spannung, elektrische 11, 12, 217
 —, gleichartige 103
 —, magnetische 221
 —, ungleichartige 103
 —, zulässige 98
 Spannungsabfall 217
 Spannungsfreiglühen 156, 364
 Spannungsreihe, elektrotechnische 131
 Spanungsverfahren, Übersicht 349
 Spartransformator 239
 Speicher der Regelungstechnik 297
 Spitzentransistor 269
 Spurzapfen 177
 Stahl, beruhigter 135
 —, hochlegierter 129, 131
 —, unberuhigter 135
 —, rostbeständiger 141
 —, säurebeständiger 141
 —, warmfester 141
 Stahlguß 141
 Stammzeichnung 15
 Standard 369
 —, Arten 369
 —, für technische Zeichnungen 70 f.
 —, für Werkstoffprüfungen 163
 —, in den sozialistischen Ländern 370
 Standardisierung 368 ff.
 —, Aufgaben 372
 —, Büro für 377
 —, Internationale Organisation für 377
 —, Koordinierungsstelle für 377
 Standmoment 89
 Standsicherheit 89
 Starkstromkabel 245
 Statik 73, 80 ff.
 Steatit 152
 Steinerscher Satz 100
 Steradian 9
 Sternschaltung 228, 238
 Sternvierer (Kabel) 281
 Steuergeräte 305
 Steuerkette 289
 Steuern, Steuerung 288 ff.
 Steuerungstechnik 319 ff.
 Stifte 43, 47 f.
 Stiftverbindungen 47, 181
 Stirnräder 187
 Stirnradgetriebe 187
 Stirnzapfen 177
 Stoffeigenschaftsändern 334
 Strahlpumpe 210
 Strangguß 127
 Strangpressen 342
 Streckgrenze 155
 Streckziehen 344
 Stromkreis, unverzweigter 218
 —, vermaschter 218
 Stromlaufplan 64
 Stromstärke 12, 216 f.
 Strömungsgetriebe 189
 Strömungskupplung 186
 Stückliste 55
 Stumpfschweißen 359
 Substitution 162
 —, äußere 162
 —, innere 162
 Synchronmotor 251
 Tangentialbeschleunigung 92
 Tangentialspannung 97
 Tauchkolbenpumpe 210
 Tauchspulmikrofon 259
 Technologie, allgemeine 330
 Teilschnitt 27
 Teilzeichnung 55
 Temperguß 142
 Tensionsthermometer 312
 Tetröde 267
 Thermodynamik 104 ff.
 Thermoplaste 166 ff.
 Tiefziehen 343
 Toleranzangaben 33 f.
 Tombak 145
 Torglieder 298
 Torr 10
 Torsionsbeanspruchung 96, 102
 Träger 82 ff., 175 ff.
 Trägheitsgesetz 74
 Tragzapfen 176
 Translation 91
 Transformator 238 f.
 TRANSLOG-Bausteine 316
 Transistoren 268 ff.
 Trennen 334, 345 f.
 Trennschalter 249
 Trennverfahren, Übersicht 345
 Trockenreibung 94 f.
 Tüpfelanalyse 161
 Turbinen 199
 Typung 368
 Übersichtsschaltplan 62
 Überstromschalter 242
 Übertragungsglied
 — siehe Glied
 Ultraschallprüfung 160
 Ultraschallschweißen 360
 Umformen 128 ff., 334
 Umformer 239
 Umformverfahren, Ordnung nach
 — Kienzle 340
 Untergruppenzeichnung 55
 Unterpulverschweißen 357
 Urformen 127, 334
 Ursprung 214
 Verbindungen, formschlüssige 180
 —, kraftschlüssige 182
 —, stoffschlüssige 178
 Verbrennungskraftmaschinen 202
 Verbrennungsmotoren 202
 Verdrehbeanspruchung 96, 102
 Verfahrenstechnik 330
 Verfahrensstandards 369
 Vergleichspannung 185
 Vergüten 138, 366
 Vergütungsstähle 139
 Versetzungsmoment 78
 Verständigungsstandards 369
 Verstärker
 —, elektrische 256, 264, 270
 —, hydraulische 316
 —, pneumatische 315
 Vervielfältigung 14
 Vickershärte 157
 Vickershärteprüfung 157
 Vidikon 261
 Viergelenkkette 188
 Vollwellen 184
 Volt 10

- Volumen 12
 - , spezifisches 104
- Volumenkräfte 73
- Vorsatz 7
- Vorzugsmaße 29
- Vorzugszahlen 29, 375, 380
- Vulkanfaser 146

- Walzen 341 f.
- Walzenbrecher 203
- Walzenmühle 204
- Wälzkolbenzähler 312
- Wälzlager 178
- Walzwerk 205
- Wärmeäquivalent, mechanisches 105
- Wärmebehandlungsverfahren 364 ff.
- Wärmeinhalt 113
- Wärmekraftmaschinen 201
- Wärmeleitung 118
- Wärmeleitzahl 118
- Wärmemenge 10, 12
- Wärme, spezifische 108, 110
- Wärmestrahlung 118
- Wärmeübergang 118
- Wärmeübertragung 118
- Warmumformen 13, 339
- Warmwalzen 130
- Wasserkraftmaschinen 199
- Watt 10
- Weber 11
- Wechselstrom 224 ff.
- Wechselstromgenerator 236 f.
- Wechselstrom-Kollektor-Motor 251, 255
- Wechselstrommotor 251
- Wehneltzylinder 263
- Weichglühen 364
- Wellen 184
- Werkstandards 369
- Werkstoffangaben in Zeichnungen 40 f.
- Werkstoffkunde 119 ff.
- Werkstoffprüfung 153 ff.
 - , mechanische 153
 - , technologische 160
 - , zerstörungsfreie 159
- Werkzeugmaschinen 206
 - , gesteuerte 321
 - , Einteilung der spanabhebenden 207
- Werkzeugstahl 139, 141
- Wheatstonesche Brücke 231
- Widerstand, elektrischer 11 f., 217, 225
 - , magnetischer 221
 - , mechanischer 194
 - , spezifischer 217
- Widerstandsmoment, axiales 99
- Widerstandsschweißen, elektrisches 50
- Widerstandsthermometer 312
- WIG-Verfahren 357
- Wilm, A. 127
- Windfrischverfahren 134
- Windkraftmaschinen 199
- Winkel, Ebene 9, 12
- Winkelbemaßung 30
- Winkelbeschleunigung 10
- Winkelgeschwindigkeit 10
- Wirkungsgrad 12
 - , thermischer 200
 - von Dampfkraftanlagen 200
 - von Wasserturbinen 198
- Wirkungsmechanismen 168 ff.
- Wirkungspaar 168, 196
- Wirkungsprinzip 168, 196
- Wirkungsstelle 168
- Wirkungsweise 168
- Wismut 120, 124
- Wöhlerkurve 97, 158
- Wöhlerversuch 158
- Wolfram 139
- Wolfram-Inert-Gasschweißen 356, 358
- Woltmannzähler 311
- Wulststumpfschweißen 359

- Zahngesperre 194
- Zahnräder 53
- Zahnradgetriebe 53 f., 187
- Zahnradpumpe 210
- Zahnschubgesperre 194
- Zapfen 176 f.
- Zeichengeräte 15
- Zeichenmaschinen 15
- Zeichnungen, technische 13 ff.
 - im Maschinenbau 23 ff.
 - in der Elektrotechnik 61 ff.
 - in der Holzindustrie 57 ff.
- Zeichnungsformate 16 ff.
- Zeichnungsmaßstäbe 18 ff.
- Zeit 9
- Zeitplanregelung 326
- Zeitplansteuerung 319
- Zelluloid 146
- Zementit 135 f.
- Zickzackschaltung 238
- Ziehen 343
- Zink 131
- Zinn 131
- Zinnbronze 145
- Zugbeanspruchung 96, 100
- Zugfedern 49
- Zugfestigkeit 97, 129 f.
- Zugkraft 84
- Zugkraft, Fortleitung 183 f.
- Zugmittelgetriebe 187
- Zugspannung 12, 100
- Zugversuch 128, 153
- Zungenfrequenzmesser 232
- Zustandsänderung, adiabatische 109
 - , isobare 110
 - , isochore 110
 - , polytrope 111
- Zustandsgleichung, allgemein thermische 107
 - , isobare 106
 - , isochore 106
 - , isotherme 105
- Zustandsgrößen, kalorische 107 ff.
 - , thermische 105
- Zweistofflegierungen 123 f.
- Zylinderschnitte 24

Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen fertigten nach Vorlagen der Verfasser: H. Grothmann, Berlin, Abschnitt 2; H. Linkwitz, Berlin, Abschnitte 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11; A. Mahnkopf †, Berlin, Abschnitt 7.

Für die 4. Auflage wurden die Zeichnungen korrigiert bzw. neuangefertigt von W. Schmidt, Berlin.

Fotos:

Hesse, Kleinmachnow: 8.45.; VEB Meßgerätewerk „Erich Weinert“, Magdeburg: 8.94.b; VEB Starkstromanlagenbau, Karl-Marx-Stadt: 8.106.; Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. H. Schumann, Rostock: 5.3; M. Seifert, Berlin: 2.4.; VEB Alda-Werk, Altendambach: 2.5.; VEB Carl Zeiss, Jena: 8.47.; VEB Geräte- und Reglerwerke, Teltow: 8.44., 8.85., 8.97., 8.98.; VEB (K) Statex, Ilmenau: 8.92.; H. Werner, Dresden: 8.99., 8.100.