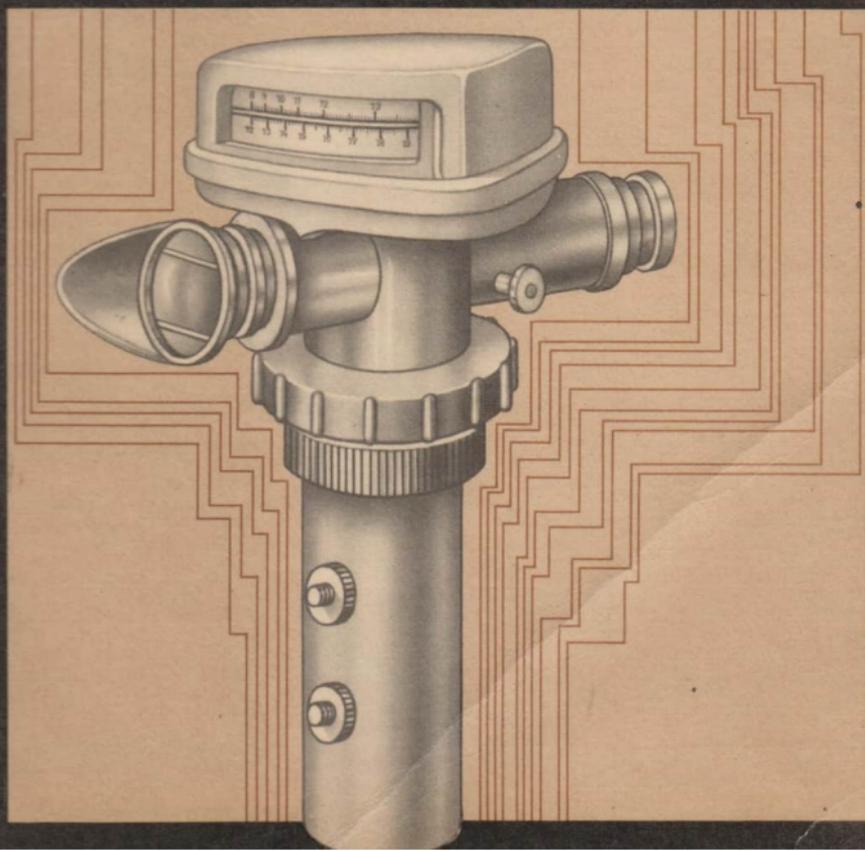


Anwendung der Physik in der Technik



Kolwig / Meyer / Oberthür / Winter

Anwendung der Physik in der Technik



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1984

Autoren:

Dr. paed. Hans-Dieter Kolwig
Grundgesetze der Optik
Dipl.-Päd., Ing. Günter Meyer
Mechanische Eigenschaften von Festkörpern
Dr. paed. Werner Oberthür
Elektrische Energie und ihre Nutzung durch Motoren
Dr. paed. Rolf Winter
Prinzipien der Temperaturmessung

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Lehrmaterial für den fakultativen Kurs „Technische Anwendung der Physik“ in den Klassen 9 und 10 bestätigt

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1983

1. Auflage

Lizenz Nr. 203/1000/83 (E 021706-1)

LSV 0645

Redaktion: Günter Meyer

Einband: Wolfgang Lorenz

Zeichnungen: H. Grothmann, V. Neupert, W. Schmidt

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 5820 Bad Langensalza

Schrift: 9/10 Extended Monotype

Redaktionsschluß: 30. 12. 1982

Bestell-Nr. 7077419

00760

Inhalt

Zur Benutzung des Buches 4 Prinzipien der Temperaturmessung 5

Bedeutung und Entwicklung
der Temperaturmeßtechnik 5
Einteilung der Temperaturmeßgeräte 6

1. Temperaturmessung mit Flüssigkeits-
und Metallthermometern 8
Physikalische Grundlagen 8
Flüssigkeitsthermometer 13
Metallthermometer 27

2. Temperaturmessung mit Wider-
standsthermometern 36
Physikalische Grundlagen 36
Metall-Widerstandsthermometer 40
Halbleiter-Widerstandsthermometer
47

3. Temperaturmessung mit
Thermoelementen 52
Physikalische Grundlagen 52
Thermoelement-Thermometer 56

4. Temperaturmessung
mit Pyrometern 63
Physikalische Grundlagen 64
Gesamtstrahlungs-pyrometer 64
Teilstrahlungs-pyrometer 65

Mechanische Eigenschaften von Festkörpern 67

1. Elastizität und Plastizität 68
Mechanische Belastung von Fest-
körpern 68
Belastungsgrenzen 73
Elastische Dehnung und Biegung 77
Kristallaufbau der Festkörper 84
Wechselwirkungskräfte zwischen
Kristallbausteinen 88
Metallographische Untersuchung 90
Spanlose Formgebung 94

2. Festigkeit und Werkstoffprüfung 96
Festigkeit und Bruchdehnung 96
Zulässige Spannung 99
Druckfestigkeit und Zugfestigkeit 100
Festigkeit eines Idealkristalls 104
Festigkeit der Realkristalle 105
Kristallbaufehler 106
Festigkeit des Werkstoffes und der
Form 108
Die Werkstoffprüfung 111

Elektrische Energie

und ihre Nutzung durch Motoren 114

1. Generatoren und Motoren 114
Generatoren 114
Wechselstromgeneratoren 117
Technische Ausführung von Wech-
selstromgeneratoren 118
Gleichstromgeneratoren 121
Technische Ausführung von Gleich-
stromgeneratoren 123
Möglichkeiten zukünftiger Gewinnung
von Elektroenergie 125
Motoren 127
Gleichstrommotoren 133
Technische Ausführung von Gleich-
strommotoren 134
Gleichstrommotoren als Generatoren
138
Wechselstrommotoren 139
Elektrische Antriebe und ihre Anpas-
sung an Arbeitsmaschinen 142
2. Übertragung elektrischer Energie 144
Transformatoren 148
Der ideale Transformator 150
Der reale Transformator 152
Anwendung von Transformatoren 154
Verbundbetrieb und Perspektiven
der Fernübertragung elektrischer
Energie 162

Grundgesetze der Optik 164	Das Erdfernrohr 192
1. Die Bilderzeugung mit Linsen 164	Anwendung der Fernrohre 192
Das Brechungsgesetz 165	Das Mikroskop 193
Die Totalreflexion 167	Der Einsatz optischer Geräte und Verfahren 196
Die Brechung an Linsen 170	
Die Linsengleichung 171	5. Farben des Lichts 198
Abbildungsfehler durch Linsen 173	Die Wellennatur des Lichts 198
	Die Wellenlänge des Lichtes 200
2. Bildspeicherung im fotografischen	Die Amplitude 200
Negativ und Positiv 176	Die Lichtgeschwindigkeit 201
Der Fotoapparat 176	Die Frequenz des Lichts 202
	Die Zerlegung des weißen Lichtes 203
3. Anwendung der Fotografie 184	Die Spektren 204
Fotografie zur Landkartengestaltung	Die Farbpfindung 206
185	Die Farbmischung 207
Fotografie in der Medizin 185	Die Anwendung der Farbmischung 208
Das Vergrößerungsgerät 186	Der Farbdruck 210
Der Diaprojektor 188	Die Farbfilter 211
4. Fernrohre und Mikroskope 189	
Das Linsenfernrohr 189	Lösungen 213
Das Galileische Fernrohr 190	Register 214
Das Keplersche Fernrohr 191	

Zur Benutzung des Buches

Der Inhalt des Buches umfaßt den Lehrstoff, der nach Rahmenprogramm in einen Grundkurs und drei Wahlkurse gegliedert ist. Innerhalb der vier Abschnitte werden viele Grundbegriffe und Gesetze, die aus dem Unterricht in den Fächern Mathematik, Physik, Chemie, Einführung in die sozialistische Produktion und Staatsbürgerkunde bekannt sind, wiederholt und angewendet. Die Darstellungen sind so gewählt, daß sich die Bereitstellung spezieller, schwierig zu beschaffender Fachliteratur weitgehend erübrigt. Unabhängig von diesem Anliegen des Buches ist im Text vielfach auf den Umgang mit Fachbüchern, Zeitschriften, Tabellen- und Formelsammlungen Bezug genommen.

Die in den Text aufgenommenen Experimente lassen sich im wesentlichen mit den in der Schule vorhandenen Experimentiergeräten durchführen.

In diesem Buch verwendete Symbole

▼	Experimente
■	Beispiele zur Erläuterung des Textes und zur Anwendung
①	Fragen und Aufträge
↗	Verweis auf andere Abschnitte, Bilder oder Beispiele
PhiÜb	Physik in Übersichten
TeilÜb	Technik und Produktion in Übersichten
PSV	Physikalische Schulversuche
TuF	Tabellen und Formeln
Fest-Ph	Festkörperphysik

Bedeutung und Entwicklung der Temperaturmeßtechnik

Im persönlichen Leben, zu Hause, am Arbeitsplatz und in fast allen technischen Disziplinen ist die Temperatur eine der am häufigsten vorkommenden Meßgrößen. In kaum einer Wohnung fehlen ein Innen- oder Außenthermometer und ein Fieberthermometer. Wir wissen, daß es oft nötig ist, Temperaturen festzustellen oder zu überwachen (Heizung, Kühlschrank, Bad).

In unserer sozialistischen Volkswirtschaft werden große Anstrengungen unternommen, um die einheimischen Rohstoffe besser zu verwerten und die zur Verfügung stehenden Energie- und Rohstofffonds effektiver einzusetzen. Im Vordergrund steht, den Wirkungsgrad des Einsatzes von Energieträgern entschieden zu erhöhen und die vorhandenen Reserven zur Energieeinsparung in allen Bereichen der Volkswirtschaft zu nutzen. Temperaturmessungen spielen dabei eine große Rolle.

Die Überwachung oder Regelung von Temperaturen ist praktisch in allen Industriezweigen und in der Landwirtschaft erforderlich. So ist zum Beispiel der beabsichtigte Verlauf chemischer Reaktionen in hohem Maße von der Temperatur abhängig, da bei Erhöhung der Temperatur im allgemeinen die Elemente besser und schneller reagieren. (↗ LB Ch 9, S. 19). In der Metallurgie kann es durch Temperaturüberhöhung zu unerwünschten Reaktionen der zu gewinnenden Metalle mit anderen Bestandteilen der Schmelze oder mit Sauerstoff aus der Umgebung kommen. Anwendungsgebiete für die Temperaturmessung sind die Herstellung bestimmter Raumtemperaturen in Produktionsbetrieben, der Schutz von Ofen- und Behälterwandungen vor thermischen Überlastungen und der verlustfreie Transport bzw. die verlustfreie Lagerung und Verarbeitung von Nahrungsgütern.

Die Temperaturmessung dient im allgemeinen folgenden Zielen:

- Sicherung des Ablaufs technologischer Prozesse,
- Beitrag zur rationellen Nutzung der Energie,
- Gewährleistung der Betriebssicherheit der Anlagen,
- Sicherung der Qualität der Produkte,
- Untersuchungen zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Anlagen.

Die Entwicklung der Temperaturmeßtechnik ist eng mit der Entwicklung der Glasbläserei verbunden. Im ausgehenden 16. Jahrhundert erlebte die Glasbläserei in Mittelitalien ihre Blütezeit. Galilei (1565 bis 1642) ist dabei als Erfinder des ersten Thermometers in die Geschichte eingegangen. Diese ersten sogenannten Florentinischen Glasthermometer zeigten aber nur Temperaturdifferenzen an und waren wegen ihrer technischen Mängel für absolute Temperaturmessungen ungeeignet. Otto von Guericke (1602 bis 1686) hatte an seinem Wohnhaus ein Thermometer angebracht, das auf einer siebenteiligen Skala „sehr kalt“, „kalt“, „mäßig kalt“, „ausgeglichen“, „mäßig warm“, „warm“ und „sehr warm“ anzeigte. Der Glasbläser Fahrenheit

(1686 bis 1736) baute Alkohol- und Quecksilberthermometer und führte für die Einteilung der Thermometerskala drei Festpunkte ein: Als 0°F legte er die Temperatur einer Salmiak-Schnee-Mischung fest (entspricht $-17,8^{\circ}\text{C}$), als 32°F die Gefrier-temperatur des Wassers (0°C) und als 96°F die Körpertemperatur eines gesunden Menschen (37°C). Der Pariser Zoologe Reaumur (1683 bis 1759) benannte die Gefrier-temperatur des Wassers mit 0°R und die Temperaturänderung, die notwendig ist, damit sich ein Gemisch aus 80% Alkohol und 20% Wasser um ein Tausendstel seines Volumens ausdehnt, als 1 Grad. Damit ergab sich für die Siedetemperatur des Wassers 80°R . Der schwedische Mathematiker Celsius (1701 bis 1744) benutzte zur Einteilung seines Flüssigkeits-Glasthermometers den Gefrier- und den Siedepunkt des Wassers. 1742 schlug er vor, den Abstand dieser beiden Punkte in 100 Grade einzuteilen und dem Gefrierpunkt des Wassers 0°C und dem Siedepunkt des Wassers 100°C zuzuordnen. Damit waren die wichtigsten Voraussetzungen für technische Temperaturmessungen gegeben. Seebeck (1770 bis 1831) entdeckte um 1820, daß in einem elektrischen Leiterkreis, in welchem zwei verschiedene Metalle miteinander verbunden waren, immer dann ein elektrischer Strom fließt, wenn zwischen den Verbindungsstellen eine Temperaturdifferenz bestand. Mit der Entdeckung dieses thermoelektrischen Effektes war die Voraussetzung zur Herstellung von Thermoelementen geschaffen. Ohm (1789 bis 1831) erkannte, daß sich der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters bei Temperaturerhöhung vergrößert.

Faraday (1791 bis 1867) stellte einen Leiter aus Silbersulfid her und machte eine erstaunliche Entdeckung: Der elektrische Widerstand stieg im Gegensatz zum Silber beim Erwärmen nicht an, sondern wurde kleiner. Er nannte diesen Stoff Halbleiter. Mit diesen beiden Entdeckungen war das Funktionsprinzip von Widerstandsthermo- metern geschaffen.

Breguett (1747 bis 1823) entwickelte die Bimetall-Spiralfeder, die bald für Temperatur- messungen Anwendung fand.

Seger (1839 bis 1893) schuf die nach ihm benannten Schmelzkegel, die bei definierten Temperaturen ihre Festigkeit verlieren, umkippen und damit die erreichte Temperatur anzeigen. Flüssigkeits-Feder-Thermometer und die Strahlungspyrometer sind Ent- wicklungen unseres Jahrhunderts.

Die Temperaturmeßtechnik erfaßt immer niedrigere und immer höhere Temperaturen und verringert die Meßfehler im gesamten Bereich. Dabei werden bekannte Effekte immer besser beherrscht und neue Effekte der technischen Nutzung erschlossen. Die genannten „klassischen“ Thermometer sind so nur Anfänge einer technischen Ent- wicklung, die heute in großer Breite vorangetrieben wird. Dem wissenschaftlich-tech- nischen Fortschritt kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Insbesondere der wissenschaftliche Gerätebau und die Meß- und Steuerungstechnik stehen vor der Auf- gabe, durch den Einsatz der Mikroelektronik Reserven zu erschließen beziehungswei- se neue Lösungen zu finden.

Zwei wichtige Herstellerbetriebe von Thermometern in der DDR sind der VEB Ther- mometerwerk Geraberg und der VEB Meßgerätewerk „Erich Weinert“ Magdeburg.

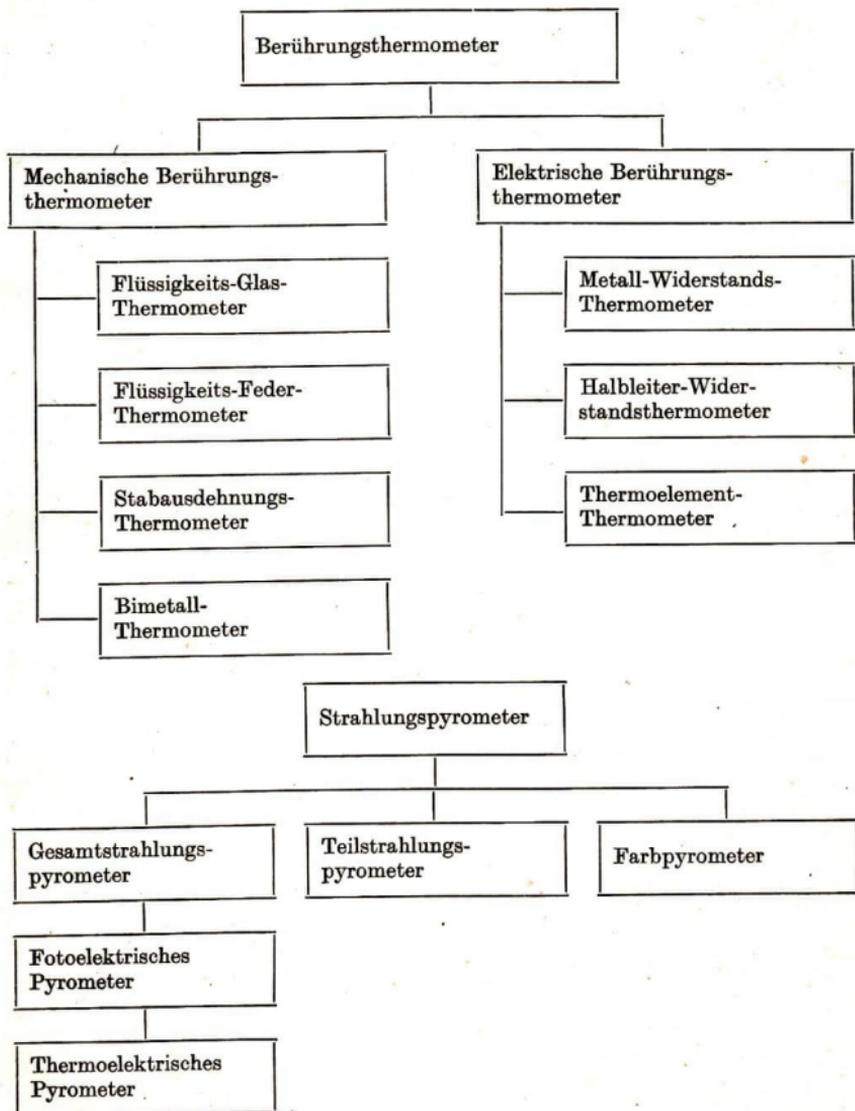
Einteilung der Temperaturmeßgeräte

Für die verschiedenen Arten der Temperaturmeßgeräte werden vier physikalische Erscheinungen ausgenutzt:

- Längen- und Volumenänderung von festen und flüssigen Stoffen bei Temperatur- änderung,
- Änderung des elektrischen Widerstands von Metallen und Halbleitern bei Tempe- raturänderungen, ·

- der thermoelektrische Effekt (↗ S. 52),
- die Temperaturstrahlung (↗ S. 63).

Die Temperaturmeßgeräte, mit denen diese physikalischen Erscheinungen genutzt werden, teilt man je nach Art der Wärmeübertragung vom zu messenden Stoff auf den Meßfühler in **Berührungsthermometer** und **Strahlungs-pyrometer** ein:



Die Verwendung eines bestimmten Temperaturmeßgerätes hängt vom erforderlichen Meßbereich, der notwendigen Meßgenauigkeit und der Zugänglichkeit der Meßstelle ab.

Grundsätzlich wählt man für Temperaturmessungen das Meßgerät aus, mit dem man mit möglichst geringem Aufwand, insbesondere an wertvollen Geräten und an Arbeitszeit, die Meßergebnisse in der erforderlichen Genauigkeit erhält.

1. Temperaturmessung mit Flüssigkeits- und Metallthermometern

Flüssigkeitsthermometer begegnen uns im täglichen Leben sehr häufig. Wir können zum Beispiel mit einem Fieberthermometer die Körpertemperatur eines erkrankten Menschen messen, um danach zu entscheiden, welche Maßnahmen zu seiner Heilung getroffen werden müssen. Auf welchem Prinzip beruht die Temperaturmessung mit dem Fieberthermometer? Warum muß man es vor der Messung ruckartig bewegen? Weshalb befindet sich Quecksilber in dem dünnen Glasrohr?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir uns zuerst mit einigen physikalischen Grundlagen beschäftigen.

Physikalische Grundlagen

Grundbegriffe zur Wiederholung. Die Temperatur ist eine Zustandsgröße, die angibt, wie kalt oder wie heiß ein Körper ist. Sie kennzeichnet die mittlere kinetische Energie der Teilchen (Atome bzw. Moleküle) des Körpers. Von mittlerer kinetischer Energie muß gesprochen werden, weil die Teilchen eines Körpers unterschiedliche Energie haben. Die im Internationalen Einheitensystem SI festgelegte Einheit für die Temperatur ist das Kelvin (K). Gleichzeitig wird neben der SI-Einheit auch die Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) verwendet.

Zwischen der Temperaturangabe in K und der Temperaturangabe in $^{\circ}\text{C}$ besteht die Beziehung

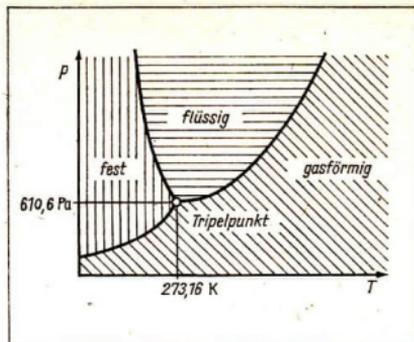
$$\vartheta(\text{in } ^{\circ}\text{C}) = T(\text{in K}) - 273,15 \quad \text{bzw.}$$

$$T(\text{in K}) = \vartheta(\text{in } ^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad \textcircled{1}$$

Das Kelvin ist im SI eine Basiseinheit. Es wird gesetzlich festgelegt als der 273,16te Teil der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

Was versteht man unter dem „Tripelpunkt des Wassers“?

Es ist bekannt, daß die Siedetemperatur des Wassers bei Normaldruck 100 $^{\circ}\text{C}$ beträgt. Verringert man den Druck, dann siedet das Wasser schon bei niedrigeren Temperaturen. Das kann man z. B. erkennen, wenn man ein Becherglas mit Wasser von Zimmertemperatur unter den Rezipienten einer Vakuumpumpe stellt und die Luft absaugt. Bei einem bestimmten Unterdruck siedet das Wasser. Verringert man den Druck bis auf 610,6 Pa (4,58 Torr), dann siedet das Wasser schon bei 0,01 $^{\circ}\text{C}$ (273,16 K), das heißt, es existieren bei dieser Temperatur gleichzeitig die beiden Aggregatzustände Wasser und Wasserdampf. Im Unterschied zur Siedetemperatur des Wassers ändert sich die Schmelztemperatur des Eises, die bei Normaldruck 0 $^{\circ}\text{C}$ beträgt, bei Drucker-niedrigung kaum. Dadurch ist es möglich, daß bei einer Temperatur von 0,01 $^{\circ}\text{C}$ (273,16 K) und einem Druck von 610,6 Pa die drei Zustandsformen des Wassers



(Eis, Wasser, Dampf) gleichzeitig nebeneinander existieren können. Im Temperatur-Druck-Diagramm des Wassers (Bild 9/1) wird deshalb der Punkt mit den Koordinaten 273,16 K und 610,6 Pa als „Tripelpunkt des Wassers“ bezeichnet. Er läßt sich sehr genau bestimmen.

Die Temperatur 0 K wird als absoluter Nullpunkt bezeichnet, da errechnet wurde, daß bei 0 K die mittlere kinetische Energie der Teilchen Null ist. Sie stellt eine Grenztemperatur dar, da sich die Atome und Moleküle eines Körpers nicht in absoluter Ruhe befinden können.

Die **Wärme** ist eine Prozeßgröße, die den Energieaustausch zwischen zwei Körpern beschreibt. Dieser Energieaustausch findet statt, wenn zwischen zwei sich berührenden Körpern eine Temperaturdifferenz vorhanden ist. Der Körper mit der höheren Temperatur gibt dabei Energie an den Körper mit der niedrigeren Temperatur ab. Die Aufnahme bzw. die Abgabe von Wärme durch einen Körper äußert sich meistens in einer Änderung seiner Temperatur.

Die Einheit der Wärme ist 1 J (Joule) oder 1 N · m (Newtonmeter). In festen Körpern wird Wärme durch **Wärmeleitung** übertragen. Die Übertragung der Wärme erfolgt in verschiedenen festen Stoffen unterschiedlich schnell; Metalle sind gute Wärmeleiter. Strömende Flüssigkeiten und Gase können außer durch Wärmeleitung auch durch **Wärmeströmung** Wärme transportieren.

Bei der **Wärmestrahlung** wird Wärme ohne Mitwirkung eines Stoffes übertragen. Im leeren Raum breitet sich die Wärmestrahlung ohne Verluste aus.

Längenänderung fester Körper. Wird ein fester Körper erwärmt oder abgekühlt, dann ändern sich alle seine Abmessungen. In vielen Fällen jedoch interessiert nur die Veränderung in einer Richtung, die **Längenänderung**. Dabei werden die Änderungen in Breite und Höhe nicht beachtet. Es ist bekannt, daß zum Beispiel beim Bau von Brücken insbesondere die Längenänderungen infolge von Temperaturschwankungen berücksichtigt werden müssen. Das eine Ende der Brücke ist deshalb auf Rollen gelagert. Die Freileitungen des elektrischen Versorgungsnetzes müssen immer ausreichend durchhängen, damit sie nicht zerreißen, wenn sie sich in der kalten Luft des Winters zusammenziehen. Die Bestimmung der Längenänderung und ihre Beachtung ist also in der Technik sehr bedeutungsvoll.

Durch ein Experiment kann festgestellt werden, wie sich die Länge von Stäben aus Metall, Glas oder anderen Stoffen mit der Temperatur ändert.

- ① Rechnen Sie folgende Temperaturangaben von °C in K um bzw. umgekehrt:
18 °C; 390 K; 0 °C; 180 K; 100 °C; 0 K.

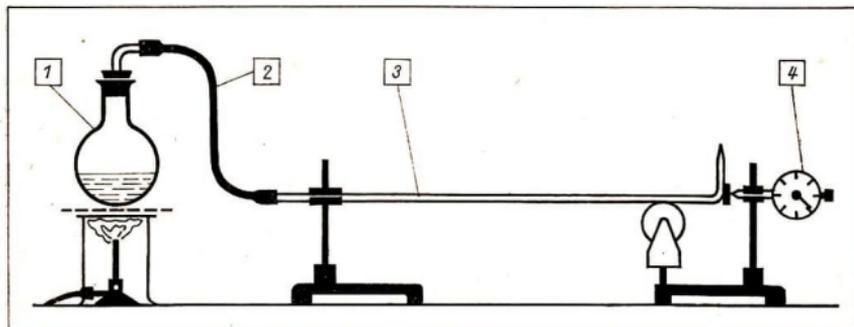
1 Bestimmen Sie die Längenänderung verschiedener Metallstäbe und eines Glasstabes gleicher Anfangslänge durch Temperaturerhöhung!

1. Vorbetrachtungen

- Kennzeichnen Sie die physikalischen Größen Temperatur und Wärme!
- Informieren Sie sich über die gesetzlichen Einheiten der Temperatur und der Wärme!

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 10/1 auf!
- Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz ΔT und der zugehörigen Längenänderung Δl , indem Sie einmal Alkoholdampf (Brennspiritus) und einmal Wasserdampf durch den auszumessenden Stab leiten!
- Stellen Sie die gemessenen Wertepaare für alle Stäbe in einem Diagramm grafisch dar!



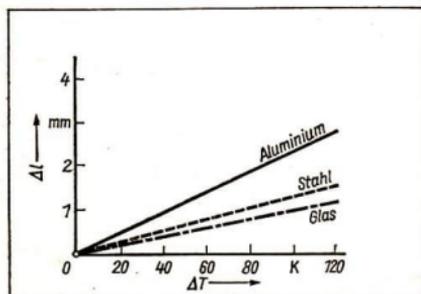
10/1 1 — Rundkolben 3 — Meßstab (Aluminium, Stahl, Glas)
2 — Gummischlauch 4 — Meßuhr mit 0,01 mm-Teilung

Ergebnis:

Bei konstanter Anfangslänge ist die Längenänderung eines Stabes von der Temperaturdifferenz abhängig (Bild 10/2). Es gilt: $\Delta l \sim \Delta T$.

Untersucht man in einem weiteren Experiment, ob die Längenänderung eines Stabes bei konstanter Temperaturdifferenz auch von seiner Anfangslänge abhängt, dann ergibt sich die in Bild 11/1 gezeigte Abhängigkeit. Das bedeutet, daß die Längenänderung auch der Anfangslänge proportional ist:

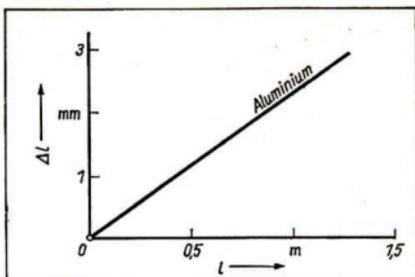
$$\Delta l \sim l$$



10/2 Abhängigkeit der Längenänderung von der Temperatur. Anfangslänge der Stäbe 1 m.

Abhängigkeit der Längenänderung eines Stabes von seiner Anfangslänge.

Temperaturänderung 100 K.



Andere Abhängigkeiten sind nicht erkennbar.

Die beiden Abhängigkeiten werden zusammengefaßt:

$$\Delta l \sim l \cdot \Delta T$$

Das bedeutet, daß der Quotient $\frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$ für einen Stoff konstant ist. Man bezeichnet diesen Quotienten mit α :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

Für die gesuchte Längenänderung fester Körper gilt also:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

α wird dabei **linearer Ausdehnungskoeffizient** genannt.

- Mit den in Bild 10/2 angegebenen Werten kann man den linearen Ausdehnungskoeffizienten für Aluminium berechnen:

Gegeben:

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\Delta T = 80 \text{ K}$$

$$\Delta l = 1,85 \text{ mm}$$

Gesucht:

α

Lösung:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

$$\alpha = \frac{1,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ m} \cdot 80 \text{ K}}$$

$$\alpha = \underline{\underline{2,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}}}$$

①

Aus der Auswertung des Experimentes ist zu erkennen, daß der lineare Ausdehnungskoeffizient **stoffabhängig** ist; so dehnt sich zum Beispiel bei gleicher Temperaturänderung Aluminium stärker aus als Glas (↗ Tabelle S. 14). Außerdem haben weitere Experimente ergeben, daß α auch **temperaturabhängig** ist, das heißt, α hat für den gleichen Stoff in verschiedenen Temperaturbereichen einen anderen Wert.

Längenänderung fester Körper

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

(1)

Volumenänderung fester und flüssiger Körper. Die Volumenänderung fester Körper

- ① Berechnen Sie anhand Ihrer im Experiment 1 ermittelten Werte den linearen Ausdehnungskoeffizienten für Stahl und Glas! Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Tabellenwerten (↗ TuF, S. 62)!

kann unmittelbar aus der Längenänderung abgeleitet werden. Da sich bei einer Temperaturerhöhung alle Abmessungen eines Körpers vergrößern, bleibt er seiner Ausgangsgestalt geometrisch ähnlich. Statt der Längenänderung Δl wird die Volumenänderung ΔV und statt des linearen Ausdehnungskoeffizienten α der Faktor $\gamma \approx 3\alpha$ verwendet. γ wird dabei **kubischer Ausdehnungskoeffizient** genannt. Man erhält damit als Gleichung zur Berechnung für die Volumenänderung eines Körpers

$$\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta T.$$

Diese Gleichung gilt auch für die Volumenänderung flüssiger Körper. Allerdings ist dabei zu beachten, daß $\gamma \approx 3\alpha$ nur für die Volumenänderung fester Körper gilt. Für die Volumenänderung flüssiger Körper wird γ als kubischer Ausdehnungskoeffizient tabellarisch gegeben (↗ TuF S. 61).

Außerdem ist für die Herstellung von Flüssigkeitsthermometern wichtig zu wissen, daß sich Hohlkörper bei Erwärmung wie massive Körper ausdehnen. Wird zum Beispiel ein Topf aus Eisen randvoll mit Wasser gefüllt und erwärmt, dann fließt ein Teil des Wassers über. ①

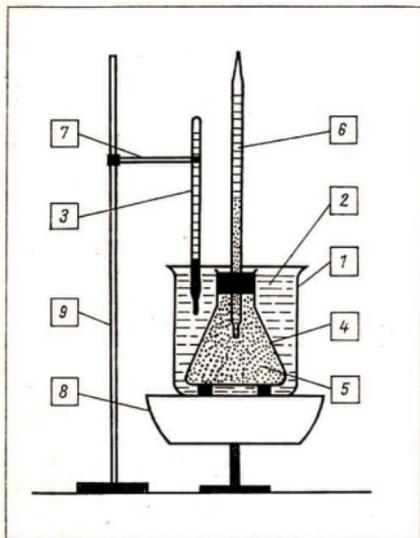
Bestätigen Sie experimentell den Zusammenhang zwischen der Volumenänderung verschiedener Flüssigkeiten und der Temperaturänderung!
Bestimmen Sie die kubischen Ausdehnungskoeffizienten!

1. Vorbetrachtung

— Informieren Sie sich über die Siedetemperaturen von Wasser, Alkohol und Petroleum!

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 12/1 auf!
- Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz ΔT und der zugehörigen Volumenänderung ΔV für verschiedene Flüssigkeiten bei jeweils gleichem Ausgangsvolumen!
- Stellen Sie die Ergebnisse in **einem** Diagramm grafisch dar!



- Berechnen Sie aus den Meßwerten die kubischen Ausdehnungskoeffizienten und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Tabellenwerten (↗ TuF, S. 61)

Ergebnis

Bei konstantem Ausgangsvolumen ist die Volumenänderung von Flüssigkeiten der Temperaturdifferenz proportional.

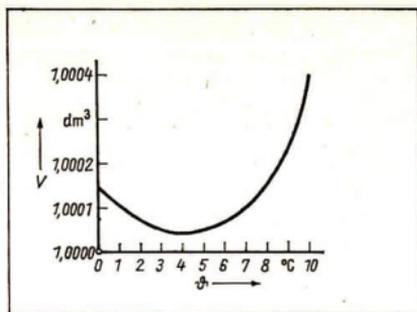
12/1

- 1 — Becherglas 250 ml
- 2 — Wasser
- 3 — Thermometer
- 4 — Erlenmeyerkolben 100 ml mit durchbohrtem Stopfen
- 5 — zu untersuchende Flüssigkeit (Wasser, Alkohol, Petroleum)
- 6 — Meßpipette
- 7 — Glasröhrenhalter
- 8 — Heizplatte mit V-Fuß
- 9 — Stativstab 500 mm

13/1

Anomales Verhalten des Wassers ($m = 1 \text{ kg}$)

Eine Abweichung von diesem im Experiment festgestellten Verhalten zeigt das Wasser in der Nähe der Erstarrungstemperatur (Bild 13/1). Die besondere Temperaturabhängigkeit des Volumens des Wassers beruht darauf, daß sich bei einer Abkühlung schon ab 4°C Strukturen mit größerem Volumenbedarf bilden, so daß das Volumen bei weiterer Abkühlung wieder ansteigt.



Ebenso wie α ist γ stoff- und temperaturabhängig. Allgemein gilt:

Volumenänderung von Körpern

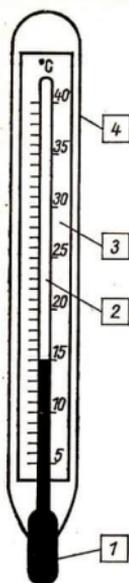
$$\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta T \quad (2)$$

Flüssigkeitsthermometer

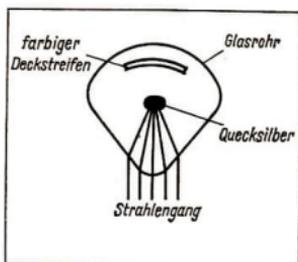
Als Flüssigkeitsthermometer bezeichnet man alle Thermometer, bei denen die Ausdehnung einer Flüssigkeit in einem Glas- oder Metallgefäß zur Messung der Temperatur ausgenutzt wird. Dabei wird die Änderung der Größe „Länge“ genutzt, um die Größe „Temperatur“ zu bestimmen, da nach unseren Experimenten $l = f(T)$ ist. Man nennt das **Meßgrößenwandlung**. Zu den Flüssigkeitsthermometern gehören Glas- und Federthermometer.

Aufbau des Flüssigkeits-Glas-Thermometers. In einem Glasgefäß ist eine Flüssigkeit eingeschlossen. Das Glasgefäß ist dabei teilweise zu einer sehr engen Röhre, einer sogenannten Kapillare, ausgezogen. Durch diese Querschnittsverengung wird die Ausdehnung der Flüssigkeit besonders deutlich sichtbar. Die Kapillare und die Skale befinden sich im allgemeinen in einem Schutzrohr aus Glas (Bild 14/1). Das Glasrohr wirkt wie eine Lupe und liefert ein vergrößertes Bild des Flüssigkeitsfadens (Bild 14/2). Der die Flüssigkeit umschließende Glasmantel dehnt sich bei Temperaturerhöhung ebenfalls aus. Der Hersteller wählt deshalb Glassorten und Thermometerflüssigkeiten, die gegeneinander eine möglichst große Differenz der Ausdehnungskoeffizienten ergeben. Dabei soll das Glas einen möglichst kleinen und die Thermometerflüssigkeit einen möglichst großen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Die Wahl der Thermometerflüssigkeit hängt aber auch noch vom zu messenden Temperaturbereich ab. Der Erstarrungspunkt der Thermometerflüssigkeit muß unterhalb der niedrigsten und der Siedepunkt oberhalb der höchsten Meßtemperatur liegen. In der Praxis wird vielfach Quecksilber als Thermometerflüssigkeit eingesetzt. Es hat einen kubischen Ausdehnungskoeffizienten von $\gamma = 18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, und der Erstarrungspunkt (-39°C) bzw. der Siedepunkt ($+357^\circ\text{C}$) liegen sehr günstig. Der Anwendungsbereich des Quecksilberthermometers liegt zwischen -30°C und $+280^\circ\text{C}$. Die Kapillare über dem Quecksilber wird evakuiert, um ein Oxydieren des Quecksilbers zu verhindern. Bei Sonderausführungen ist es möglich, durch eine Stickstofffüllung der Kapillare über dem Quecksilber mit 8 MPa den Siedepunkt so weit zu

① Begründen Sie diese Aussage!

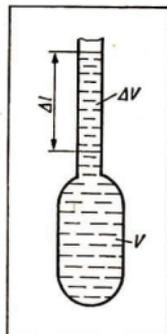


14/1
Aufbau eines Glasthermometers
 1 – Ausdehnungsflüssigkeit
 2 – Kapillarrohr
 3 – Skale
 4 – Glasumhüllung



14/2
Querschnitt eines Glasthermometers

14/3
Prinzip des Flüssigkeitsausdehnungsthermometers



erhöhen, daß der Meßbereich bis auf $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgedehnt werden kann. Bei diesen hohen Temperaturen muß allerdings anstelle des Glases Quarz als Werkstoff eingesetzt werden. Für die Messung tieferer Temperaturen als $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden Alkohol, Toluol, Pentan oder eine Quecksilber-Thallium-Legierung eingesetzt. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Meßbereiche und die mittleren kubischen Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Thermometerflüssigkeiten:

Thermometerflüssigkeit	Meßbereich in $^{\circ}\text{C}$	Mittlerer kubischer Ausdehnungskoeffizient in K^{-1}
Quecksilber	-30 bis $+750$	$18 \cdot 10^{-5}$
Quecksilber $+8,5\%$ Thallium	-60 bis $+750$	$19 \cdot 10^{-5}$
Alkohol	-110 bis $+50$	$110 \cdot 10^{-5}$
Toluol	-70 bis $+100$	$109 \cdot 10^{-5}$
Pentan	-200 bis $+20$	$159 \cdot 10^{-5}$
Thermometerglas		$\approx 2 \cdot 10^{-5}$

Wirkungsweise. Die Temperaturmessung mit Flüssigkeits-Glas-Thermometern beruht auf der unterschiedlichen Volumenausdehnung eines Glasgefäßes und der darin befindlichen Flüssigkeit. Wird die Ausdehnung des Glasgefäßes vernachlässigt, dann erfolgt die Volumenzunahme nach (2). Die Volumenzunahme ergibt sich außerdem aus

$$\Delta V = A \cdot \Delta l,$$

wobei A die Querschnittsfläche der Kapillare und Δl die Längenänderung des Flüssigkeitsfadens ist (Bild 14/3). Daraus ergibt sich durch Gleichsetzen

$$A \cdot \Delta l = \gamma \cdot V \cdot \Delta T.$$

Die Anzeige der Temperatur erfolgt nur durch die Längenänderung Δl des Flüssigkeitsfadens (Meßgrößenwandlung), da A infolge des geringen Ausdehnungskoeffizienten für Glas als konstant angenommen werden kann:

$$\Delta l = \frac{\gamma \cdot V}{A} \cdot \Delta T. \quad (3)$$

Empfindlichkeit. Die Empfindlichkeit einer Meßanordnung ist definiert als

$$E = \frac{\Delta L}{\Delta M}, \quad (4)$$

wobei ΔL die Verschiebung der Marke am Meßgerät und ΔM die Veränderung der Meßgröße bedeuten. Daraus ergibt sich für das Glasthermometer ($\Delta L = \Delta l$ und $\Delta M = \Delta T$)

$$E = \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{\gamma \cdot V}{A}.$$

Kubischer Ausdehnungskoeffizient γ , Ausgangsvolumen V und Querschnittsfläche A bestimmen also die Empfindlichkeit des Flüssigkeits-Glasthermometers. Da sie vom Bau des Thermometers abhängen, lassen sich durch ihre Veränderung Glasthermometer unterschiedlicher Meßbereiche und gewünschter Empfindlichkeit herstellen. ①

- Ein Quecksilber-Glasthermometer hat eine Quecksilberfüllung von $0,25 \text{ cm}^3$, eine Skalenlänge von 15 cm und einen Meßbereich von 0 bis $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Wie groß ist der erforderliche Kapillarquerschnitt?

Wie groß ist die Empfindlichkeit?

Gegeben:

$$V = 0,25 \text{ cm}^3$$

$$\Delta l = 15 \text{ cm}$$

$$\Delta T = 100 \text{ K}$$

$$\gamma = 18 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Gesucht:

A ; E

Lösung:

$$\Delta l = \frac{\gamma \cdot V}{A} \cdot \Delta T$$

$$A = \frac{\gamma \cdot V \cdot \Delta T}{\Delta l}$$

$$A = \frac{18 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 0,25 \text{ cm}^3 \cdot 100 \text{ K}}{15 \text{ cm}}$$

$$A = \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3}{15 \text{ cm}}$$

$$A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$$

$$E = \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

$$E = \frac{15 \text{ cm}}{100 \text{ K}}$$

$$E = 1,5 \frac{\text{mm}}{\text{K}} \quad \text{oder}$$

$$E = 1,5 \frac{\text{mm}}{^\circ\text{C}}$$

Hat die Kapillare einen Kreisquerschnitt, so entspricht das einem Durchmesser von $0,2 \text{ mm}$. ②

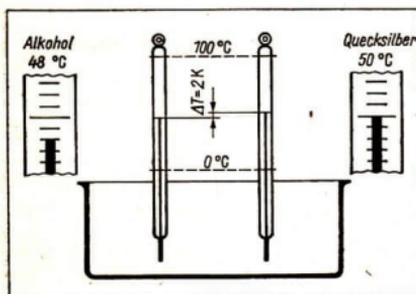
- ① Erläutern Sie anhand Gleichung (3), wie man bei vorgegebener Thermometerlänge durch Veränderung der Querschnittsfläche der Kapillare Meßbereich und Empfindlichkeit des Thermometers verändern kann!
- ② Wie groß muß die Skalenlänge eines Alkoholthermometers sein, wenn die Alkoholfüllung $0,3 \text{ cm}^3$, der Kapillarquerschnitt $0,05 \text{ mm}^2$ und der Meßbereich $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt? Wie groß ist die Empfindlichkeit?

Eichung. Für die praktische Temperaturmessung, vor allem für die Eichung von Thermometern, wurde die Internationale Praktische Temperaturskala (IPTS) eingeführt. Die heute gesetzlich gültige IPTS von 1968 beruht auf sogenannten Fixpunkten, denen definierte Temperaturwerte zugeordnet worden sind:

Fixpunkt	Temperatur in °C	Temperatur in K
Siedepunkt des Sauerstoffs O ₂	-182,962	90,188
Tripelpunkt des Wassers H ₂ O	+0,010	273,160
Erstarrungspunkt des Wassers H ₂ O (Schmelzpunkt des Eises)	±0,000	273,150
Siedepunkt des Wassers H ₂ O	+100,000	373,150
Erstarrungspunkt des Goldes Au	+1064,430	1337,580

Für das Eichen der Thermometerskale zwischen diesen Fixpunkten benutzt man Normal-Platin-Widerstandsthermometer (↗ S. 40), die vom ASMW der DDR für Eich- und Prüfzwecke zur Verfügung gestellt werden.

Für die grobe Einteilung von Thermometerskale genügt eine lineare Teilung zwischen den Fixpunkten. Die Genauigkeit hängt dabei von der Änderung des Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit mit der Tempertur ab. Bei Quecksilber liegt zum Beispiel eine nahezu lineare Ausdehnung vor, während das bei Alkohol nicht der Fall ist. Bei einem übereinstimmenden Fundamentalabstand (z. B. 0 °C und 100 °C) und gleichmäßig geteilter Skale würden sich deshalb bei einem Quecksilber- und bei einem Alkoholthermometer bei beliebigen Zwischentemperaturen unterschiedliche Anzeigen ergeben (Bild 16/1). Die Fehlergrenzen der industriell hergestellten Flüssigkeits-Glasthermometer liegen je nach Bauart und Meßbereich zwischen 0,01 K und 10 K. Eine genauere Einteilung als 0,01 K ist nicht zweckmäßig. Vergrößert man z. B. das Gefäßvolumen bei gleichbleibendem innerem Kapillardurchmesser, so wächst dadurch die thermische Trägheit des Thermometers in einem unerwünschten Maß. Verringert man den Kapillardurchmesser bei gleichbleibendem Gefäßvolumen, dann können die Kapillarkräfte so stark zunehmen, daß das Thermometer einen „toten Gang“ bekommt. Das heißt, daß für die gleiche Temperatur höhere oder tiefere Werte angezeigt



16/1 Quecksilber- und Alkoholthermometer

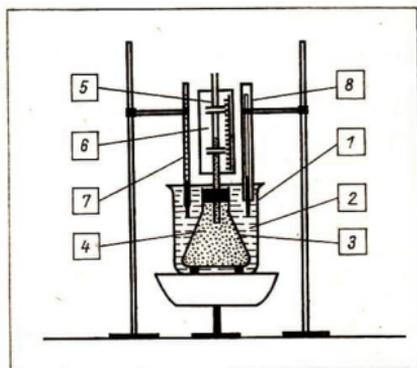
werden, je nachdem, ob ein Steigen oder Sinken des Flüssigkeitsfadens vorausgegangen ist. Das ist insbesondere bei Quecksilberthermometern der Fall. Bei den mit organischen Flüssigkeiten (Alkohol, Toluol usw.) gefüllten Thermometern kommt noch hinzu, daß es benetzende Flüssigkeiten sind. Das bedeutet, daß ein Teil der Flüssigkeit bei der Abkühlung des Thermometers an der Kapillarwand hängenbleibt und erst nach und nach herabsinkt. ① ②

Eichen Sie experimentell ein Flüssigkeitsthermometer!

- Bauen Sie das Experiment gemäß Bild 17/1 auf!
- Markieren Sie auf der rechten Hälfte der Millimeterskala des Ölthermometers und auf der Abdeckhülse des Alkoholthermometers die Stellen für 0 °C und 100 °C, indem Sie in das Becherglas einmal Eiswasser und einmal siedendes Wasser füllen!
- Vergleichen Sie die Markierungen auf der Abdeckhülse mit der Originalskala des Alkoholthermometers!
- Teilen Sie auf der Millimeterskala des Ölthermometers den Abstand zwischen den beiden Markierungen für 0 °C und 100 °C in 20 gleiche Teile (5 °C-Abstände)!
- Geben Sie noch einmal Eiswasser in das Becherglas! Markieren Sie jetzt auf der linken Seite der Millimeterskala mit Hilfe eines Quecksilberthermometers die Stellen für 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, ... , 100 °C, indem Sie das Wasser mit der Heizplatte gleichmäßig erwärmen!
- Vergleichen Sie die linear geteilte und die mit Hilfe des Quecksilberthermometers gewonnene Temperaturskala des Ölthermometers miteinander!
- Geben Sie die größten Fehlergrenzen an!

17/1

- 1 – Becherglas 250 ml
- 2 – Wasser
- 3 – Erlenmeyerkolben 100 ml
mit durchbohrtem Stopfen
- 4 – Öl (Speiseöl, Maschinenöl, o. ä.)
- 5 – Glasrohr, $d_1 \approx 7$ mm
- 6 – Pappscheibe,
mit Millimeterpapier beklebt
- 7 – Quecksilberthermometer
- 8 – Alkoholthermometer mit Abdeckhülse



- ① Erläutern Sie, warum es einen Zusammenhang zwischen Fehlergrenze und Meßbereich des Thermometers gibt!
- ② Warum wird Wasser nicht als Thermometerflüssigkeit verwendet?

Einsatzmöglichkeiten der Flüssigkeits-Glasthermometer. Da Glas ein zerbrechlicher Werkstoff ist, kann man die Flüssigkeits-Glasthermometer nur für bestimmte Zwecke einsetzen. Wo finden sie nun in der Praxis Anwendung?

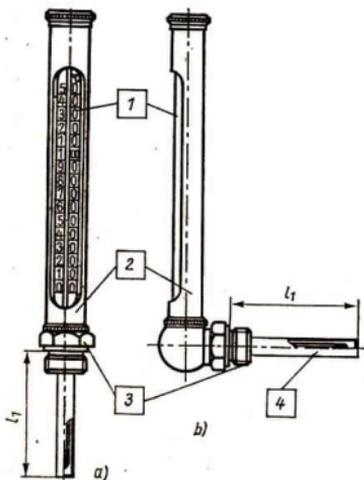
Der VEB Thermometerwerk Geraberg stellt für verschiedene Einsatzzwecke folgende Glasthermometer her:

- Laborthermometer in verschiedenen Längen und in abgestuften Temperaturbereichen zwischen $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- technisch-wissenschaftliche Thermometer (Maschinenthermometer, meteorologische Thermometer, Thermometer für gewerbliche Zwecke, Thermometer für den landwirtschaftlichen Bedarf),
- Kontaktthermometer,
- Maximum- und Minimumthermometer.

Die Laborthermometer werden vor allem für Kontroll- und Vergleichsmessungen in Laboratorien eingesetzt. Für sehr genaue Messungen gibt es Präzisions-Thermometer, z. B. Elfsatz-Laborthermometer mit einem Meßbereich von $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Präzisions-Thermometer zeichnen sich dadurch aus, daß durch spezielle konstruktive Maßnahmen ein großes Auflösungsvermögen und damit kleine Temperaturmeßfehler erreicht werden.

Maschinenthermometer sind Flüssigkeits-Glasthermometer in korrosionsfesten metallischen Schutzgehäusen. Sie dienen der Temperaturmessung in Metallschmelzen, Salzschnmelzen, Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen im Temperaturbereich von $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei Drücken bis 4 MPa . Die Lebensdauer des Maschinenthermometers ist sehr stark abhängig vom Material und der Ausführung des Schutzrohres (Bild 18/1). Die Schutzrohre sollen deshalb folgende Eigenschaften haben:

- temperatur- und temperaturwechselbeständig
- beständig gegen aggressive Stoffe (Schmelzen, Gase und Dämpfe)
- gasdicht auch bei höheren Temperaturen
- gut wärmeleitend
- unempfindlich gegen Stoß, Schlag und Schwingung.



18/1 Maschinenthermometer

- a) gerade Ausführung b) winklige Ausführung
 1 - Thermometer 3 - Verschraubung
 2 - Schutzkappe 4 - Schutzrohr

Diese Eigenschaften lassen sich mit einem einzigen Material nicht verwirklichen. Deshalb ist eine sachgemäße Auswahl der Schutzrohrwerkstoffe notwendig. Oft werden mehrere Schutzrohre gleichzeitig verwendet (z. B. Metall und Keramik). Folgende Übersicht gibt Aufschluß über einige gebräuchliche metallische und keramische Schutzrohrwerkstoffe:

Werkstoff	Maximale Temperatur	Anwendungszweck
Messing, feuerverzinkt	-100 °C ... +200 °C	Kühlräume, Molkereien
Stahl, feuerverzinkt	-50 °C ... +100 °C	Soleleitungen
Stahl, emailliert	+400 °C ... +600 °C	Abwässer; verdünnte Laugen und Säuren; Rauchgase
Stahl 35.8.	+275 °C ... +600 °C	Rohrleitungen und Behälter für Wasser und Dampf unter hohem Druck; Luftöfen; Salzbäder
Spezialguß	+700 °C	Blei-, Zink-, Zinn-, Alumi- niumschmelzen
Ignodur (Keramik)	bis +1300 °C	Glüh- und Härteöfen; Industrieabgase

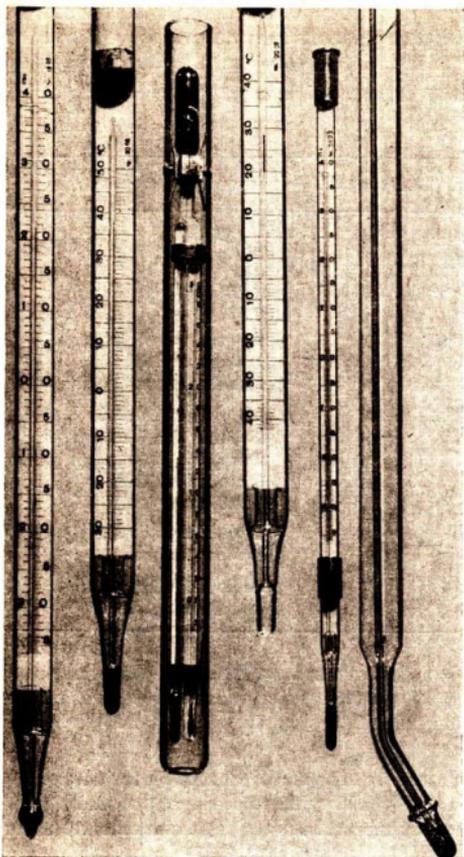
Die Maschinenthermometer werden in Rohrleitungen bzw. Behälter eingeschraubt. Dabei muß eine Mindesteintauchtiefe von 15 cm eingehalten werden. Bei Rohrleitungen wird das Thermometer in den Krümmer eingebaut, um zusätzliche Wirbelbildungen zu vermeiden.

Thermometer für gewerbliche Zwecke werden für die verschiedensten Bereiche hergestellt. So gibt es zum Beispiel Zucker- und Konditoreithermometer, Grubenthermometer, Vulkanisierthermometer, Brutschrankthermometer, Backofenthermometer, Obststeckthermometer und Fleischsteckthermometer (Bild 20/1).

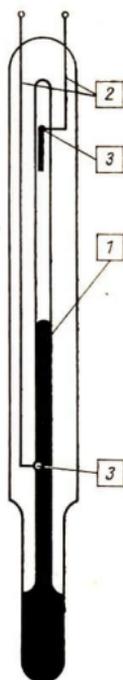
Thermometer für den landwirtschaftlichen Bedarf gibt es als Mietenthermometer, Molkereithermometer, Käsereithermometer usw. Die **Kontaktthermometer** haben gegenüber den anderen Flüssigkeits-Glaskthermometern den Vorzug, daß sie auch für die Fernmessung der Temperatur sowie für Steuer- und Regelaufgaben eingesetzt werden können. Insbesondere werden sie für das Signalisieren von Grenzwerten und für Zweipunktregelungen angewandt.

Beim **Kontaktthermometer** sind in das Thermometergefäß noch zwei elektrische Kontakte mit entsprechenden Anschlußdrähten eingeschmolzen. Der eine Draht befindet sich unten im Thermometergefäß, der andere reicht von oben in die Kapillare hinein (Bild 20/2). Als Thermometerflüssigkeit dient wegen seiner guten elektrischen Leitfähigkeit nur Quecksilber. Nimmt die Temperatur des Meßgegenstandes zu, dann steigt das Quecksilber in der Kapillare an und berührt bei der eingestellten Temperatur den Draht. Dadurch wird ein Stromkreis geschlossen, der mit Hilfe eines Relais beliebige Schaltvorgänge betätigen kann. Das Relais ist notwendig, wenn die Schaltstromstärke 30 mA überschreitet.

Man unterscheidet einstellbare und nichteinstellbare Kontaktthermometer. Bild



20/1
Thermometer für
gewerbliche Zwecke



20/2
Aufbau eines
Kontaktthermometers
1 — Quecksilber
2 — Anschlußdrähte
3 — Kontakte

20/2 zeigt ein nichteinstellbares Kontaktthermometer. Beim einstellbaren Kontaktthermometer ist der obere Kontakt mit Hilfe einer Spindel in der Höhe verstellbar. Damit kann man den Schaltpunkt beliebig einstellen (Bild 21/1). (1) (2)

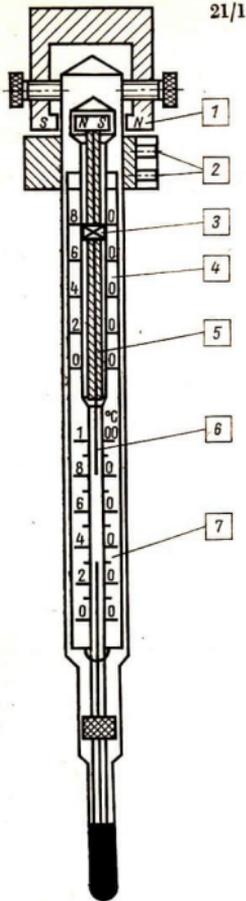
4
▼ Bauen Sie mit Hilfe eines Kontaktthermometers das Modell einer Alarmanlage auf!

1. Vorbetrachtungen

- Informieren Sie sich über die Funktionsweise eines Relais mit Arbeitsstrom- bzw. mit Ruhestromkontakten!
- Entwerfen Sie das Schaltbild für das Modell einer Alarmanlage! Verwenden Sie dabei ein Kontaktthermometer, ein Relais und eine Klingel!

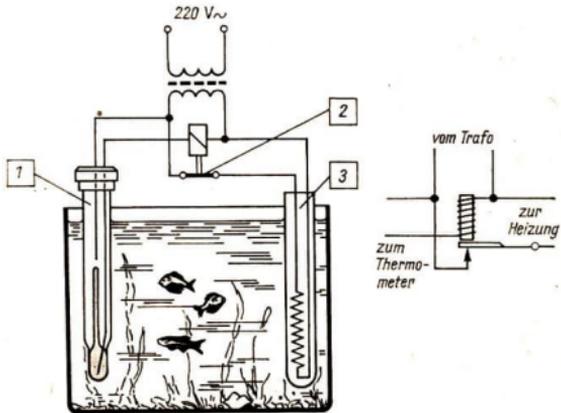
2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie das Experiment nach Ihrem Schaltplan auf!
- Lassen Sie die Schaltung vom AG-Leiter kontrollieren!
- Überprüfen Sie das Funktionieren der Anlage!



Prinzip des einstellbaren Flüssigkeits-Kontaktthermometers

- 1 – Einstellmagnet, drehbar gelagert
- 2 – Anschlußkontakte
- 3 – Sollwertanzeige
- 4 – Sollwertskale
- 5 – Gewindespindel
- 6 – Kontakt
- 7 – Istwertskale



21/2

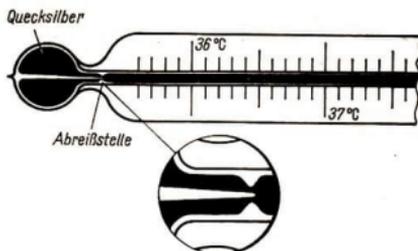
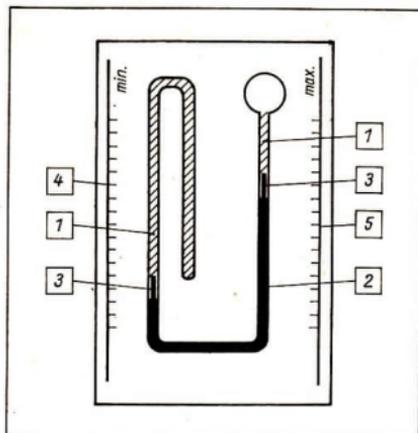
Schaltung des Kontaktthermometers bei der Aquariumheizung

- 1 – Einstellbares Kontaktthermometer
- 2 – Ruhestromkontakte
- 3 – Heizung

Die Zweipunktregelung mit Kontaktthermometern wird meistens zur Konstanthaltung einer bestimmten Temperatur eingesetzt. Das Beispiel einer geregelten Aquariumheizung zeigt Bild 21/2.

Weitere Einsatzgebiete der Zweipunkt-Temperaturregler liegen vor allem in der Landwirtschaft. So finden sie in industriemäßig produzierenden Großviehanlagen, Brutapparaten, Trocknungsanlagen, Gewächshäusern und Lagerhallen Anwendung.

- ① Erläutern Sie anhand Bild 21/1 die Wirkungsweise des einstellbaren Kontaktthermometers!
- ② Warum eignen sich Flüssigkeitsthermometer mit Alkoholfüllung nicht als Kontaktthermometer?
- ③ Erläutern Sie anhand Bild 21/2 das Prinzip der Zweipunktregelung zur Temperaturkonstanthaltung!



22/2 Prinzip des Fieberthermometers

22/1

Aufbau des Maximum-Minimum-Thermometers

- | | |
|--------------------|------------------|
| 1 — Alkoholfüllung | 4 — Minimumskale |
| 2 — Quecksilber | 5 — Maximumskale |
| 3 — Stahlstifte | |

In Lagerhallen ist z. B. für eine gleichbleibende Qualität des Lagergutes die Einhaltung einer niedrigen Temperatur notwendig. In Gewächshäusern muß die Temperatur der Beleuchtungsstärke (z. B. Tag-Nacht-Rhythmus) und den Wachstums- bzw. Reifeperioden der Pflanzen angepaßt werden. Man kann das erreichen, indem der Warmwasser- bzw. Dampfzufluß für die Heizungsanlagen durch ein Ventil gesteuert wird. Die Betätigung dieses Ventils kann z. B. elektromagnetisch (Magnetventil) oder mit Hilfe eines Elektromotors erfolgen. Dazu ist eine elektrische Hilfsenergie notwendig, deren Zufluß wiederum durch das Kontaktthermometer einschließlich eines Relais gesteuert wird. ①

Das **Maximum-Minimum-Thermometer** besteht aus einem doppelt U-förmig gebogenen Rohr (Bild 22/1). Als Thermometerflüssigkeit dient Alkohol, der sich im mittleren kurzen Schenkel befindet. Im großen U-Rohr befindet sich ein Quecksilberfaden, der jedoch thermometrisch nicht in Funktion tritt. Er hat nur die Thermometerflüssigkeit gegen den anderen Thermometerteil abzuschließen. Dieser ist ebenfalls mit Alkohol gefüllt, aber nicht ganz vollständig. In dem noch über der Oberfläche des Alkohols vorhandenen freien Raum befindet sich Alkoholdampf. Die Anzeige der Höchst- und Tiefsttemperatur erfolgt durch kleine Stahlstifte, die auf dem Quecksilber lagern und beim Zurückweichen des Fadens infolge der Adhäsionskräfte an der Glaswand haften. Die erneute Inbetriebnahme des Thermometers erfolgt durch Heranziehen der Stahlstifte an die Quecksilberkuppen mit Hilfe eines Magneten. ②

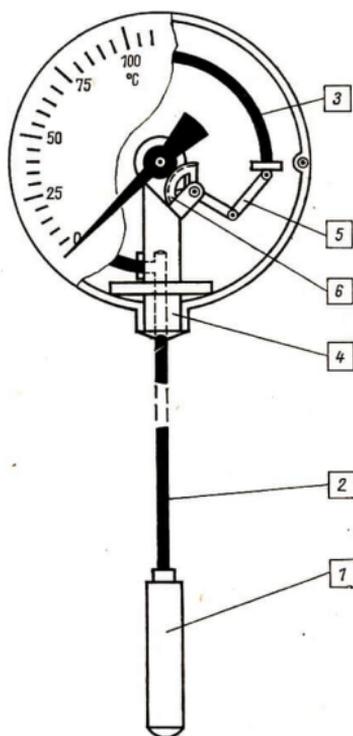
Ein spezielles Maximumthermometer ist das **Fieberthermometer**. Im Quecksilberbehälter befindet sich ein Glasdorn, der in die Kapillare des Quecksilberfadens hineinragt (Bild 22/2). Bei steigender Temperatur dehnt sich das Quecksilber aus und tritt durch den verbleibenden engen Spalt zwischen Rohrwand und Dorn ungehindert hindurch. Bei einer Abkühlung reißt der Quecksilberfaden an der Spitze des Dorns ab und verbleibt im Rohr. Man kann infolgedessen am Ende des Fadens die erreichte höchste Temperatur ablesen. Will man erneut eine Messung durchführen, muß man den Quecksilberfaden durch einen kräftigen Ruck in das Quecksilbergefäß zurückschleudern.

Zusammenfassung

Flüssigkeits-Glasthermometer sind einfach aufgebaut, leicht ablesbar und preiswert. Sie bestehen aus einem Ausdehnungsgefäß und einer Kapillare aus Glas, die mit einer Flüssigkeit gefüllt sind (Quecksilber, Alkohol, Toluol). Die Anzeige der Temperatur erfolgt durch die Längenänderung des Flüssigkeitsfadens. Für wissenschaftliche und technische Temperaturmessungen werden die verschiedensten Thermometerformen hergestellt. Nachteilig wirkt sich aus, daß sie empfindlich gegen mechanische Beanspruchung sind und sich an unübersichtlichen Stellen schlecht ablesen lassen.

Flüssigkeits-Federthermometer. Sollen einzelne Temperaturwerte in Entfernungen bis zu 50 m von der Meßstelle übertragen werden, dann verwendet man häufig Flüssigkeits-Federthermometer. Diese Thermometer bestehen aus einem Temperaturfühler, einer Kapillarleitung und einem Röhrenfedermanometer (Bild 23/1). Diese Teile bilden ein druckdicht abgeschlossenes System, das mit Flüssigkeit gasfrei gefüllt ist.

Wird der Meßfühler in das zu messende Medium gebracht, dann vergrößern sich Volumen bzw. Druck der Flüssigkeit infolge Temperaturerhöhung. Die Druckerhöhung führt zur Formveränderung der Röhrenfeder, und diese Formveränderung wird als Maß für die Temperatur genutzt und ähnlich wie beim Röhrenfedermanometer angezeigt (Meßgrößenwandlung). Der Temperaturfühler wird aus nicht-rostendem Stahl oder Messing gefertigt. Für die Messung niedriger Temperaturen in Gasen und Räumen benötigt man eine besonders große Oberfläche

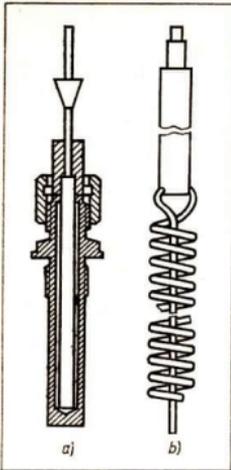


23/1

Aufbau eines Flüssigkeits-Federthermometers

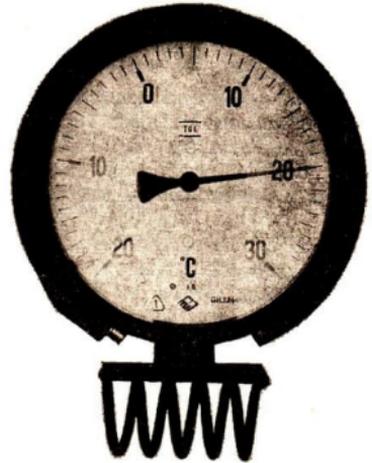
- 1 — Temperaturfühler
- 2 — Kapillarleitung
- 3 — Röhrenfeder
- 4 — Halterung
- 5 — Hebelwerk
- 6 — Zahnsegment mit Zahnrad

- ① Fertigen Sie ein Schema zur Temperaturregelung in einem Gewächshaus an!
- ② Beschreiben Sie die Wirkungsweise des Maximum-Minimum-Thermometers anhand Bild 22/1!



24/1 Verschiedene Meßfühler für Flüssigkeits-Federthermometer
 a) Normaler Meßfühler
 b) Meßfühler für Raumtemperaturen

24/2 Quecksilber-Federthermometer
 (VEB Meßgerätewerk Beierfeld)



des Meßfühlers. Man erreicht das, indem das Ausdehnungsgefäß die Form eines gewendelten Rohres erhält (Bild 24/1 b). ^①

Für die Kapillarleitung ($d_1 = 0,1 \text{ mm}$ bis $0,8 \text{ mm}$; $d_a = 4 \text{ mm}$, $l = 1 \text{ m}$ bis 50 m) wird Kupfer oder Stahl eingesetzt. Zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen wird sie in vielen Fällen mit einer biegsamen Stahlmantelhülle versehen. Zur Füllung des Flüssigkeitsthermometers verwendet man hauptsächlich Quecksilber, Toluol oder Xylol. Damit erreicht man Meßbereiche von $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+600 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Ausdehnungskoeffizienten dieser Flüssigkeiten sind gegenüber Kapillar- und Meßfühlerwerkstoffen groß.

Die Skale eines Flüssigkeits-Federthermometers ist linear geteilt (Bild 24/2).

Im Gegensatz zu den Glasthermometern wirken sich Raumtemperaturschwankungen auf die Federthermometer als Fehlerquellen aus. Dabei wächst der Fehler mit der Länge der Kapillarleitung. Deshalb werden kurze Kapillarleitungen unter 10 m Länge bevorzugt. ^②

Müssen größere Entfernungen ab 50 m überbrückt werden, dann lassen sich zusätzliche Fehler durch Verlegen einer zweiten Kapillarleitung ohne Meßfühler in unmittelbarer Nähe der ersten vermeiden. Dabei wirkt der Druck dieser zweiten Kapillarleitung, die als Blind- bzw. Kompensationsleitung bezeichnet wird, auf eine zweite Röhrenfeder, die der ersten entgegenwirkt (Bild 25/1). ^③

Die Fehlergrenze der Flüssigkeitsfederthermometer liegt zwischen $0,5\%$ und $1,5\%$. Sie sind anspruchlos und zuverlässig. Empfindlichstes Teil ist die Kapillare, die deshalb sehr sorgfältig verlegt werden muß und gegen mechanische Einwirkungen zu schützen ist. Beim praktischen Einsatz ist die Kapillare unter Trägern oder in Rohren zu verlegen, der kleinste Biegeradius darf 60 mm nicht unterschreiten. Wegen des robusten Aufbaus und der begrenzten Fernübertragungsmöglichkeit werden Flüssig-

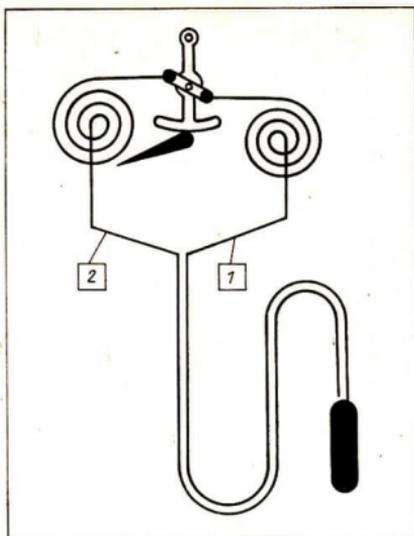
keits-Federthermometer bevorzugt in der Chemieindustrie, Nahrungsgüterindustrie, Holzindustrie, in Heizungsanlagen und Reglerstationen eingesetzt. In Kraftfahrzeugen finden sie zur Öl-, Kühlwasser- und Kühllufttemperaturkontrolle Anwendung.

Flüssigkeits-Federthermometer können auch mit elektrischen Kontakten ausgerüstet werden, so daß sie zur Signalisierung von Grenzwerten und für Zweipunktregelungen eingesetzt werden können, ähnlich wie beim Glas-Kontaktthermometer (Bild 25/2).

Federthermometer mit einstellbaren Schaltkontakten werden z. B. als Temperaturwächter in Waschmaschinen und Kühlschränken und in Räumen zur Zweipunkt-Temperaturregelung eingesetzt.

④ ⑤

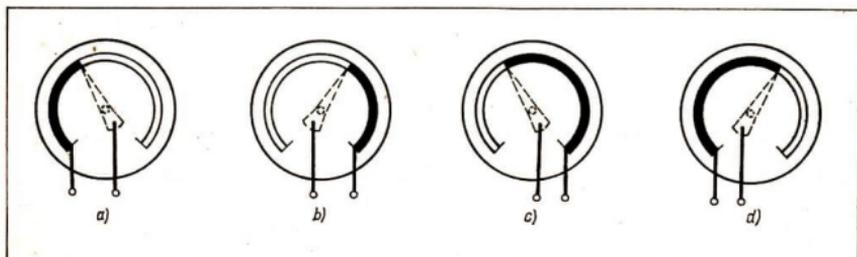
Bei diesen Temperaturwächtern wird die Röhrenfeder des Anzeigerätes durch



25/1

Flüssigkeits-Federthermometer
mit Blindkapillare

1 — Meßkapillare 2 — Blindkapillare



25/2 Prinzip der Kontaktvorrichtung an Flüssigkeits-Federthermometern

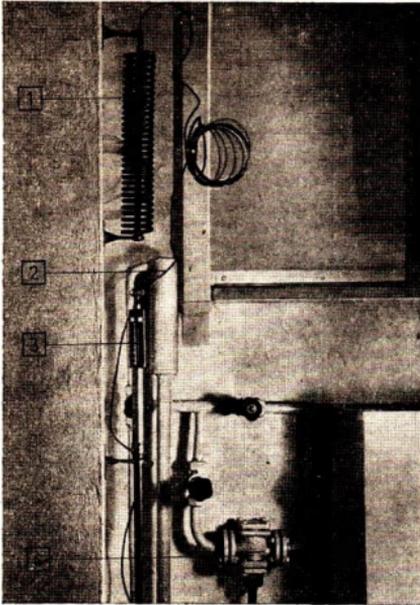
a) Minimumkontakt für Arbeitsstrom

c) Minimumkontakt für Ruhestrom

b) Maximumkontakt für Arbeitsstrom

d) Maximumkontakt für Ruhestrom

- ① Begründen Sie, warum zur Messung von Raumtemperaturen der Meßfühler eine große Oberfläche haben muß!
- ② Begründen Sie die Fehlanzeige durch Raumtemperaturschwankungen bei langen Kapillarleitungen!
- ③ Erläutern Sie das Wirkprinzip der Kompensationskapillarleitung!
- ④ Erläutern Sie anhand Bild 25/2 die Wirkungsweise der verschiedenen elektrischen Kontakte!
- ⑤ Entwerfen Sie ein Schaltbild für eine Kühlschrank-Temperaturregelung mit einem Flüssigkeits-Federthermometer mit Schaltkontakten (Temperaturwächter)!



26/1

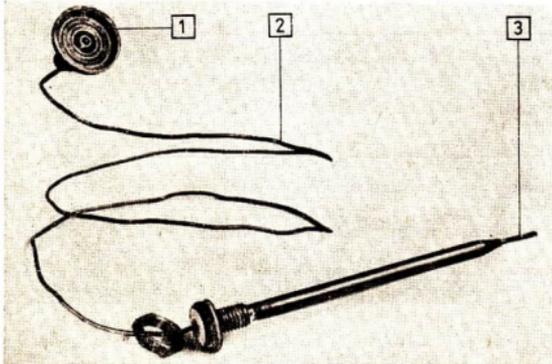
Regel­ein­rich­tung mit Flüssig­keits­
Federthermometer für eine Raum­heizung

- 1 – Meßfühler
- 2 – Kapillare
- 3 – Sollwert­ein­stellung
- 4 – Heizungsventil

einen Metall­fal­ten­balg oder eine Mem­brane er­setzt, die bei Aus­dehnung der Füll­flüssig­keit ihr Vo­lu­men ver­größern und da­bei die Schalt­kon­takte be­täti­gen. (Bilder 26/1 und 26/2).

Zusammenfassung

Flüssig­keits­Federthermometer be­stehen aus einem ab­ge­schlos­se­nem System von Meßfühler (Aus­dehnungs­gefäß), Kapillar­lei­tung und Röhren­feder­ma­no­meter. Das ge­samte System ist mit Flüssig­keit (Quecksilber, Toluol) gefüllt. Die An­zeige der Tem­pe­ra­tur er­folgt durch die Druck­än­de­run­gen in dem ab­ge­schlos­se­nem System. Es be­steht die Mög­lich­keit der Über­tra­gung der Meß­werte über eine Ent­fernung bis zu 50 m.



26/2

Temperaturwächter einer
Waschmaschine
(Ausdehnungsteil)

- 1 – Membrane
- 2 – Kapillare
- 3 – Meßfühler

Metallthermometer

In vielen Haushalten findet man Heißwasserspeicher (Warmwasserboiler). Entnimmt man ihnen eine bestimmte Menge heißen Wassers, so schaltet sich automatisch die Heizung ein. Zu erkennen ist das am Aufleuchten einer Kontrollampe. Beim Erreichen der eingestellten Temperatur schaltet die Heizung automatisch wieder ab. Grundlage dafür sind Metallausdehnungsthermometer. Wie sind sie aufgebaut und worauf beruht ihr Wirkprinzip? Wie kann man damit die Heizung des Warmwasserboilers automatisch regeln? Darauf soll im folgenden eine Antwort gegeben werden.

Die Temperaturmessung mit Metallausdehnungsthermometern beruht auf der unterschiedlichen Längenausdehnung zweier verschiedener fester Körper. Je nach Anordnung der beiden Ausdehnungskörper unterscheidet man zwei Bauarten:

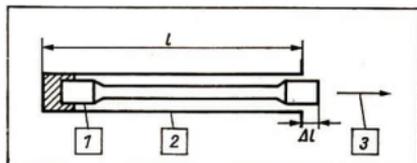
- Stabausdehnungsthermometer und
- Bimetallthermometer.

Metallstabausdehnungsthermometer. Die beiden Ausdehnungsstäbe werden entweder nebeneinander oder unter Verwendung eines Rohres ineinander angeordnet. Während das Rohr aus einem Material mit großem linearen Ausdehnungskoeffizienten besteht

27/1

Fühler eines Metallstabausdehnungsthermometers

- 1 – Ausdehnungsstab
- 2 – Metallrohr
- 3 – Bewegungsrichtung des Stabes bei Temperaturabnahme



(Stahl, Gußeisen, Messing, u. a.), befindet sich im Inneren ein Stab mit kleinem Ausdehnungskoeffizienten (Quarz, Porzellan, Invar). Beide Ausdehnungskörper sind an einem Ende fest miteinander verbunden. Durch Temperaturänderung entsteht am anderen Ende eine relative Verschiebung Δl , die als Maß für die Temperatur genutzt wird (Bild 27/1).

$$\Delta l = l \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T, \quad (5)$$

wobei l die gemeinsame Ausgangslänge der Stäbe und ΔT die mittlere Temperaturänderung des gesamten Ausdehnungskörpers ist. ① ②

Aus den Gleichungen (4) und (5) ergibt sich für die Empfindlichkeit des gesamten Meßfühlers

$$E = l \cdot (\alpha_1 - \alpha_2). \quad (6)$$

Um eine große Empfindlichkeit des Meßgerätes zu erhalten, muß man Stäbe mit großen Ausgangslängen und Werkstoffe mit sehr unterschiedlichen linearen Ausdehnungskoeffizienten verwenden. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten der in der Praxis verwendeten Werkstoffe:

-
- ① Leiten Sie Gleichung (5) aus Gleichung (1) her (S. 11)!
 - ② Erläutern Sie anhand Bild 27/1 die relative Verschiebung der Ausdehnungskörper bei Temperaturänderung!

Werkstoff	α in K^{-1}
Aluminium	$23,8 \cdot 10^{-6}$
Messing	$18,4 \cdot 10^{-6}$
Stahl	$11 \dots 16 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Nickel	$13 \cdot 10^{-6}$
Gußeisen	$10,4 \cdot 10^{-6}$
Glas	$6 \cdot 10^{-6}$
Porzellan	$3 \cdot 10^{-6}$
Invar	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Quarzglas	$0,5 \cdot 10^{-6}$

(Invar ist eine Legierung aus 36% Nickel und 64% Eisen)

- Der Meßfühler eines Metallstabthermometers besteht aus einem Messingrohr und einem Porzellanstab von je 50 cm Länge. Wie groß ist die relative Verschiebung des Porzellanstabes gegenüber dem Messingrohr, wenn der Meßfühler einer Temperaturänderung von 100 K ausgesetzt wird?

Gegeben:

$$l = 0,5 \text{ m}$$

$$\alpha_{\text{Messing}} = 18,4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_{\text{Porzellan}} = 3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\Delta T = 100 \text{ K}$$

Lösung:

$$\Delta l = l \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T$$

$$\Delta l = 0,5 \text{ m} (18,4 \cdot 10^{-6} K^{-1} - 3,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}) \cdot 100 \text{ K}$$

$$\Delta l = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\Delta l = \underline{\underline{0,74 \text{ mm}}}$$

Gesucht:

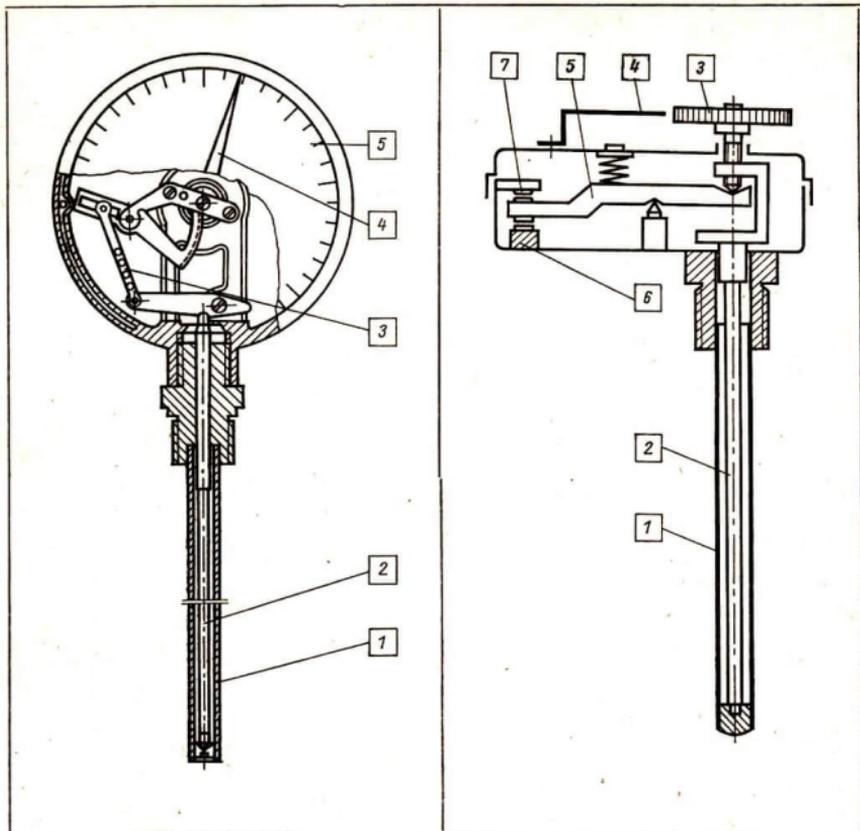
$$\Delta l$$

Die relative Ausdehnung des Meßfühlers beträgt etwa 0,8 mm. ①

Das Beispiel zeigt, daß für eine große Empfindlichkeit des Meßgerätes große Ausgangslängen notwendig sind. Die praktischen Ausführungen der Meßfühler haben deshalb eine Länge von 0,5 m bis 5 m. Metallstabausdehnungsthermometer gibt es entweder als Gerät mit Skale und Zeiger zur analogen Anzeige der Temperatur (Bild (29/1) oder als Zweipunktregler (ähnlich dem Kontaktthermometer) entsprechend Bild 29/2). ②

Der Vorzug der Metallstabthermometer besteht in ihrem äußerst einfachen Aufbau, der die Störanfälligkeit weitgehend herabsetzt. Sie besitzen eine hohe Ansprechgeschwindigkeit und eine große Stellkraft. Demgegenüber wirken sich die meist benötigten großen Meßfühlerlängen oft nachteilig aus. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Temperatur nicht gleichmäßig über die gesamte Länge des Meßfühlers verteilt ist. Die Anzeigefehler des Metallstabthermometers liegen in den Grenzen $\pm 2\%$ des Meßbereichumfanges. ③

Der praktische Einsatz der Metallstabthermometer mit analoger Meßwertanzeige erfolgt meist in der chemischen Industrie zur Temperaturüberwachung in Vorrats- und Verarbeitungsbehältern für Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase. Bis zu Temperaturen von 200 °C wird dabei ein Messingrohr und bis 1000 °C ein Nickel-Chrom-Stahlrohr verwendet. Häufiger als die Anzeigegeräte werden die mit Kontakten ausgerüsteten Metallstabthermometer eingesetzt. Als Zweipunktregler gestatten sie den Bau einfacher und sicher funktionierender Temperaturregelanlagen, z. B. für Trocken-



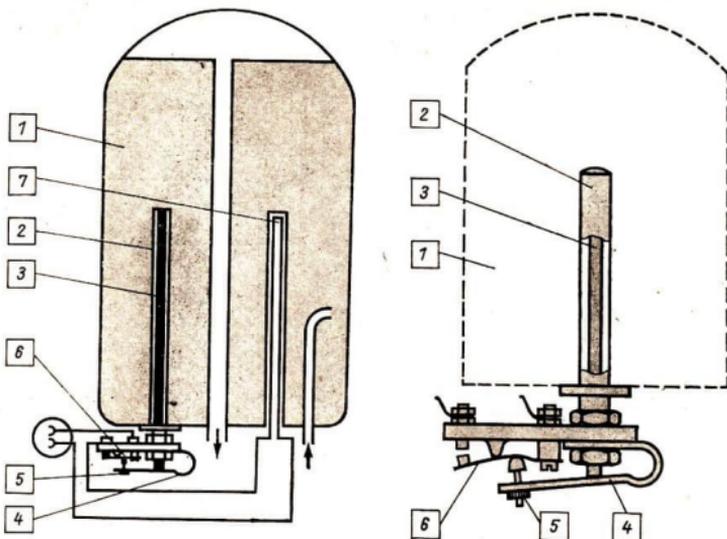
29/1
Metallstabthermometer mit analoger Anzeige

- 1 – Rohr
- 2 – Innenstab
- 3 – Hebelsystem zur Übertragung der Längenänderung
- 4 – Zeiger
- 5 – Skale

29/2
Metallstabthermometer mit einstellbaren elektrischen Kontakten

- 1 – Rohr
- 2 – Innenstab
- 3 – Einstellskala
- 4 – Zeiger
- 5 – Übersetzungshebe
- 6 – Anschlag
- 7 – Kontakt

- ① Wie lang muß der Meßfühler eines Metallstabausdehnungsthermometers aus einem Gußsenrohr und einem Invarstab sein, wenn die relative Ausdehnung bei einem Meßbereich von $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 mm betragen soll?
- ② Erläutern Sie anhand der Bilder 29/1 und 29/2 die Wirkungsweise der Metallstabausdehnungsthermometer mit analoger Anzeige und mit elektrischen Kontakten!
- ③ Welche Temperatur wird vom Meßgerät angezeigt, wenn die Temperaturverteilung längs des Meßfühlers ungleichmäßig ist?



30/1 Temperaturregelung in einem elektrischen Heißwasserspeicher

a) Prinzipieller Aufbau

- 1 — Wasserbehälter
- 2 — Metallrohr aus Messing oder Stahl
- 3 — Glasstab oder Invarstab
- 4 — Stellfeder

b) Stabthermometer mit Kontakten

- 5 — Stellschraube zur Temperaturvorwahl
- 6 — Kontaktfeder
- 7 — Heizpatrone

schränke zum Trocknen lackierter Gegenstände und keramischer Erzeugnisse und für Heißwasserspeicher (Warmwasserboiler). Bild 30/1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Temperaturregelung an einem Heißwasserspeicher für 10 Liter (beim 5-l-Speicher wird ein anderes Prinzip angewandt). ^①

Metallstabthermometer finden auch in den Industriezweigen Anwendung, wo Temperaturen in explosionsgefährdeten Anlagen geregelt werden sollen. Sie werden dann nicht als Regler mit elektrischer Hilfsenergie eingesetzt, sondern die Betätigung eines Ventils oder einer Drosselklappe erfolgt hydraulisch. Bild 31/1 zeigt das vereinfachte Schema zur Temperaturregelung in einem gasbeheizten Industrieofen. Solche Öfen dienen meist als Schmiede-, Glüh- oder Härteöfen zum Aufheizen von Werkstücken aus Stahl. Zur Temperaturregelung müssen die Gas- und die Luftzufuhr gesteuert werden. ^②

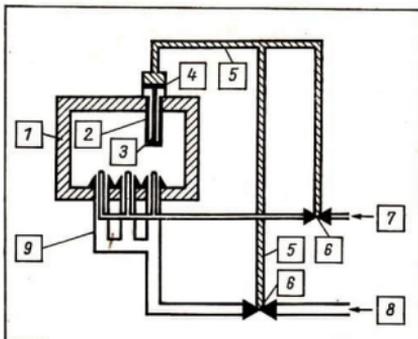
Bimetallthermometer. Werden 2 Metallstreifen mit unterschiedlichen linearen Ausdehnungskoeffizienten miteinander verbunden (genietet, aufgewalzt), dann krümmt sich bei Temperaturerhöhung dieser Bimetallstreifen nach der Seite hin, an der sich das Metall mit dem geringeren Ausdehnungskoeffizienten befindet.

5 ▼ Beobachten Sie die Formänderung eines Bimetallstreifens bei Temperaturerhöhung durch eine Kerzenflamme!

31/1

Temperaturregelung in einem Industrieofen

- 1 — Ofen
- 2 — Metallrohr
- 3 — Porzellanstab
- 4 — Zylinder mit Kolben
- 5 — Hydrauliköl
- 6 — Ventilstelleinrichtung
- 7 — Gaszufuhr
- 8 — Luftzufuhr
- 9 — Brennersystem



In der Praxis werden für die Herstellung des Bimetallstreifens meistens Messing und Invar verwendet. Der Betrag der Durchbiegung eines Bimetallstreifens hängt aber nicht nur vom Unterschied in den linearen Ausdehnungskoeffizienten, sondern auch von der Dicke und der Länge der Streifen ab. Deshalb werden die Blechstreifen möglichst dünn ausgewalzt und dann zu einer Spirale aufgerollt.

Beim Bimetallthermometer wird die Temperaturabhängigkeit der Biegung des Bimetallstreifens entweder zur analogen Anzeige der Temperatur oder in Verbindung mit elektrischen Kontakten zur Signalisierung von Grenzwerten und zur Zweipunktregelung eingesetzt. Bild 31/2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Bimetallthermometers. ③

Beim Bimetallthermometer wird die Temperaturabhängigkeit der Biegung des Bimetallstreifens entweder zur analogen Anzeige der Temperatur oder in Verbindung mit elektrischen Kontakten zur Signalisierung von Grenzwerten und zur Zweipunktregelung eingesetzt. Bild 31/2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Bimetallthermometers. ④

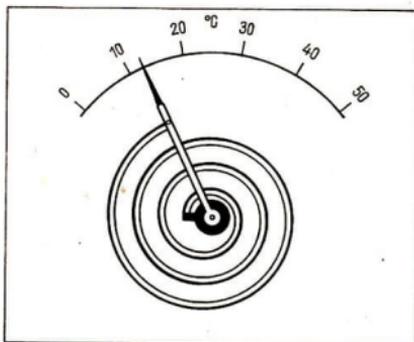
Bauen Sie aus Aufbauteilen das Modell eines Bimetallthermometers auf!

1. Vorbetrachtungen

- Informieren Sie sich im Anleitungsheft zum SEG Kalorik über die Möglichkeit des Aufbaus eines Bimetallthermometers!
- Informieren Sie sich im gleichen Heft über den Umgang mit dem Bimetallstreifen!

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie nach der entsprechenden Abbildung im Anleitungsheft zum SEG Kalorik das Modell eines Bimetallthermometers auf!
- Demonstrieren Sie mit Hilfe einer Kerzenflamme das Funktionieren des Thermometers!

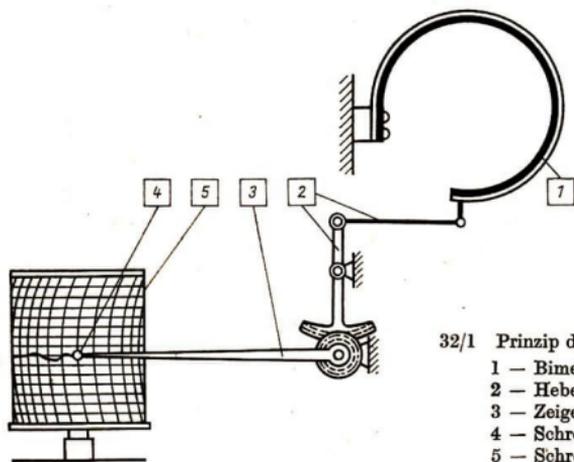


31/2 Aufbau eines Bimetallthermometers

- ① Erläutern Sie anhand Bild 30/1 die Temperaturregelung in einem elektrischen Heißwasserspeicher! Beschreiben Sie auch die Möglichkeit der Temperaturvorwahl!
- ② Wie erfolgt die Temperaturregelung in einem gasbeheizten Industrieofen (Bild 31/1)?
- ③ Begründen Sie die Auswahl dieser Metalle für die Herstellung von Bimetallstreifen!
- ④ Erläutern Sie anhand Bild 31/2 die Funktionsweise des Bimetallthermometers!

Der Anwendungsbereich des Bimetallthermometers ist von den Eigenschaften des Bimetallstreifens abhängig. Die gebräuchlichsten Meßbereiche erfassen eine Temperaturdifferenz von 150 K mit einer oberen Grenze von +600 °C.

Bimetallthermometer sind robust und wartungsfrei. Ihre Meßunsicherheit beträgt $\pm 2\%$ bis $\pm 3\%$; schnell aufeinanderfolgenden Temperaturänderungen vermögen sie nicht oder nur in ungenügendem Maße zu folgen. Deshalb werden sie in Verbindung mit der analogen Temperaturanzeige in der Technik nur für solche Meßaufgaben eingesetzt, die für langsam ablaufende Produktionsprozesse erforderlich sind. Bewährt haben sich die Bimetallthermometer im **Thermografen**. Hier ist am Zeiger des Thermometers eine Schreibspitze angebracht, die auf einer durch ein Uhrwerk angetriebenen Schreibwalze die Meßwerte aufzeichnet (Bild 32/1). Man erhält so ein Diagramm,



32/1 Prinzip des Thermografen

- 1 — Bimetallstreifen (Temperaturfühler)
- 2 — Hebelwerk
- 3 — Zeiger
- 4 — Schreibspitze
- 5 — Schreibtrommel

das den Temperaturverlauf für einen längeren Zeitraum angibt. Thermografen werden vor allem in der Meteorologie zur Wetterforschung, aber auch zu Kontrollzwecken in Laboratorien und Gewächshäusern eingesetzt.

In Verbindung mit elektrischen Kontakten ist der Einsatz von Bimetallthermometern in der Praxis weit verbreitet. Zur Signalisierung von Grenztemperaturen dienen Temperaturschalter, die insbesondere in Alarm- und Feuermeldeanlagen eingesetzt werden. Den schematischen Aufbau einer automatischen Alarmanlage zur Raumüberwachung zeigt Bild 33/1.

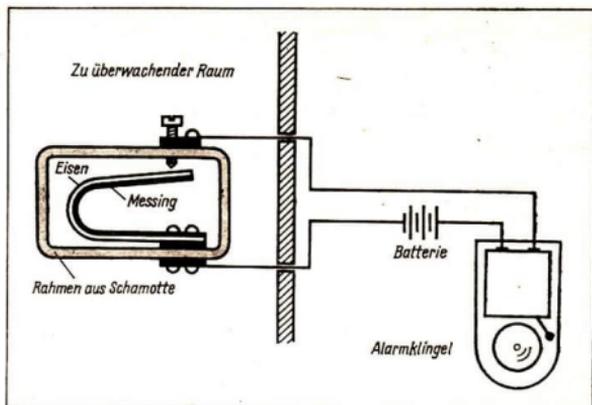
Zur Temperaturüberwachung von gelagertem Getreide werden in Getreidesilos Kapseln mit Bimetallschaltern in das aufgeschüttete Getreide gesteckt. Jede Kapsel ist mit der Alarmanlage verbunden. Bei Überschreitung einer Grenztemperatur, die zur starken Vermehrung von Fäulnisserregern und zur Brandgefahr führen würde, wird der Alarmstromkreis geschlossen.

7 ▼ Bauen Sie aus Aufbauteilen das Modell eines automatischen Feuermelders mit Bimetallstreifen auf!

1. Vorbetrachtungen

- Informieren Sie sich im Anleitungsheft zum SEG Kalorik über die Möglichkeit des Aufbaus eines automatischen Feuermelders mit einem Bimetallstreifen!
- Entwerfen Sie dazu einen entsprechenden Schaltplan!

Prinzipieller Aufbau einer Feuermeldeanlage



2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie das Experiment nach Ihrem Schaltplan auf!
- Lassen Sie die Schaltung vom AG-Leiter kontrollieren!
- Überprüfen Sie das Funktionieren der Anlage!

Auch als Zweipunktregler finden Bimetallthermometer mit elektrischen Kontakten breite Anwendung, vor allem in Haushaltsgeräten. So sind z. B. die 5-l-Heißwasserspeicher, Reglerbügeleisen, Heizkissen, Elektrobacköfen und Luftduschen mit solchen Bimetallthermometern ausgerüstet. Meistens läßt sich die gewünschte Temperatur auch noch mit Hilfe eines Regelknopfes einstellen.

Bauen Sie aus Aufbauteilen das Modell eines Bimetall-Temperaturreglers auf!

1. Vorbetrachtungen

- Informieren Sie sich im Anleitungsheft zum SEG Kalorik über den Aufbau einer Zweipunkttemperaturregelung mit einem Bimetallstreifen!
- Entwerfen Sie dazu einen entsprechenden Schaltplan!
- Informieren Sie sich im o. a. Anleitungsheft über die Betriebsspannung der Heizwendel!

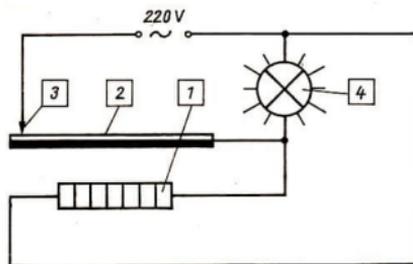
2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie das Experiment nach Ihrem Schaltplan auf, und lassen Sie die Schaltung vom AG-Leiter kontrollieren!
- Demonstrieren Sie die Funktionsweise der Temperaturregelung!
- Erhöhen Sie die Schaltfrequenz durch Verändern der Lage der Heizwendel zum Bimetallstreifen!

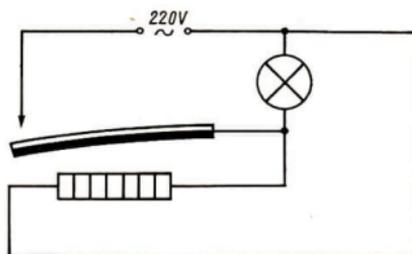
Bild 34/1 zeigt das Schaltbild eines Reglerbügeleisens, Bild 34/2 die praktische Ausführung des Bimetallreglers. ^②

Ein weiteres Einsatzgebiet für Bimetallthermometer stellen die Überstromauslöser in Motorschutz- und Leitungsschutzschaltern dar. Schutzschalter dienen zum Schutz von Anlagen und Geräten vor Beschädigung durch Überströme. **Leitungsschutzschalter**

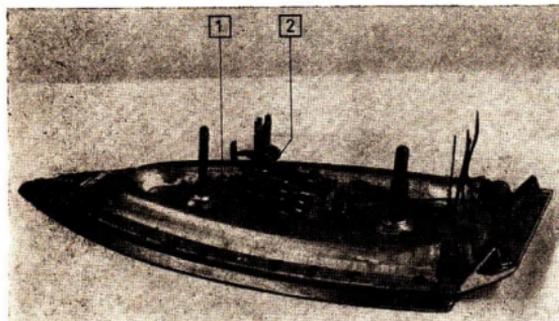
- ① Erläutern Sie anhand Bild 33/1 die Wirkungsweise einer automatischen Alarmanlage mit Bimetallschalter!
- ② Erläutern Sie anhand der Bilder 34/1 und 34/2 die Temperaturregelung beim Reglerbügeleisen und beim Heizkissen!



a)



b)



34/1
Temperaturregelung
bei einem Reglerbügeleisen

- 1 — Heizung
- 2 — Bimetallstreifen
- 3 — Kontakt
- 4 — Kontrolllampe

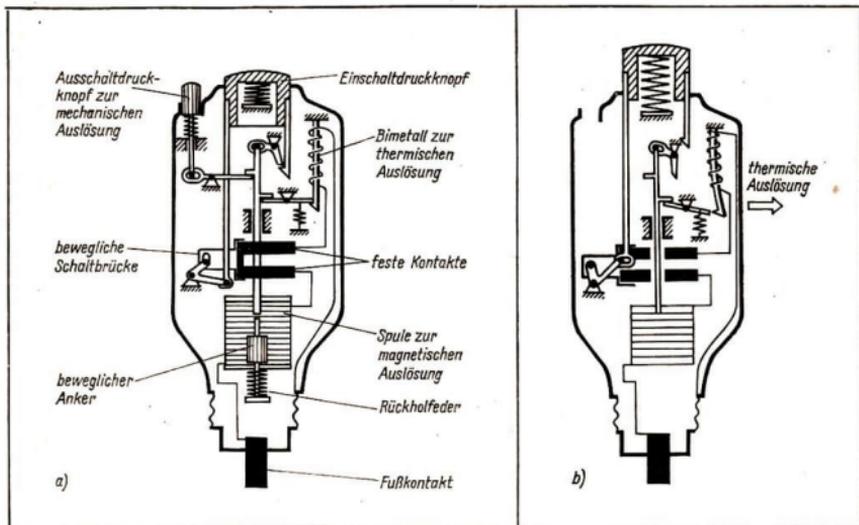
34/2
Bügeleisenregler

- 1 — Schaltkontakte
- 2 — Bimetallstreifen

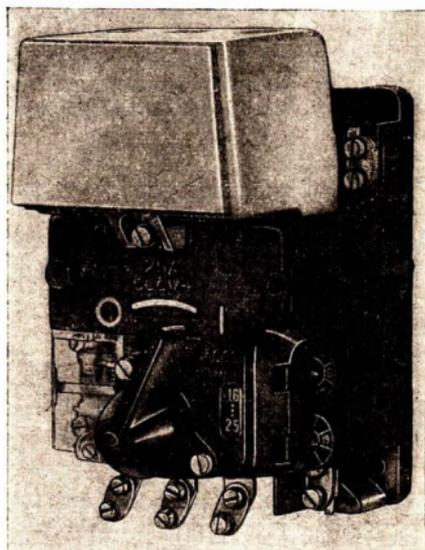
finden z. B. im Haushalt als Sicherungsautomaten Anwendung (Bild 35/1). Im Inneren¹ des Gehäuses befindet sich ein Druckkontakt, der durch Eindringen des Schaltknopfes geschlossen wird. Eine Sperrklinke hält den Kontakt geschlossen (Bild 35/1 a). Der Strom durchfließt im Sicherungsautomaten einen Heizdraht, der um einen Bimetallstreifen gewickelt ist. Je stärker der Strom ist, desto mehr krümmt sich der Bimetallstreifen infolge der Temperaturerhöhung und drückt dabei auf die Sperrklinke. Wird eine bestimmte Höchststromstärke überschritten, so gibt die Klinke den Druckschalter frei, der Druckkontakt öffnet sich, und der Stromkreis ist unterbrochen. Der Schalterknopf springt heraus (Bild 35/1 b).

① Tritt plötzlich eine sehr große Stromstärke auf (Kurzschluß), dann wird durch die thermische Auslösung erst nach einer gewissen Zeit der Stromkreis geöffnet, so daß dabei schon Schäden an den Leitungen und Geräten auftreten können. Deshalb ist im Sicherungsautomaten noch eine magnetische Auslösung eingebaut, die auf eine plötzliche sehr große Erhöhung der Stromstärke sofort anspricht und den Stromkreis öffnet.

② **Motorschutzschalter** sollen Elektromotoren vor Schäden durch Überlastung bewahren. Bei ihnen wird auch durch einen Bimetallkontakt bei Erreichen einer bestimmten Maximalstromstärke der Motor vom Netz getrennt. Läuft zum Beispiel das Messer eines elektrischen Rasenmähers auf einen großen Widerstand (Stein, Holz, harte Bodenklumpen, u. ä.), dann steigt die Stromstärke im Motor sehr stark an. Der Schutzschalter trennt dann den Motor vom Netz und kann erst nach einer gewissen Zeit (Abkühlung des Bimetallstreifens) wieder durch einen Druckkontakt eingeschaltet werden. Ein ähnlicher Motorschutzschalter befindet sich auch in elektrischen Handbohrmaschinen. Dort kann es insbesondere beim Betrieb mit Zusatzeinrichtungen zu Überlastungen kommen, z. B. beim Verklemmen der Handkreissäge. Den



35/1
 Schematischer Aufbau
 eines Sicherungsautomaten
 a) im eingeschalteten Zustand
 b) thermische Auslösung



35/2 Motoschutzschalter für 25 A

- ① Wodurch kann es in der Wohnung zur Überschreitung der von dem Sicherungsautomaten vorgegebenen Höchststromstärke kommen ?
- ② Warum dauert es eine bestimmte Zeit, bis die thermische Auslösung eines Sicherungsautomaten anspricht ?

Schutzschalter eines großen Industrielektromotors zeigt Bild 35/2. Hier läßt sich die Maximalstromstärke, bei der der Schalter anspricht, an einer Skale einstellen (↗ LB ESP 10, S. 76).

Zusammenfassung

Metallthermometer werden als Stabausdehnungs- oder Bimetallthermometer hergestellt. Ihr Wirkprinzip beruht auf der unterschiedlichen Längenausdehnung von zwei verschiedenen Metallen in Abhängigkeit von der zu messenden Temperatur. Während beim Stabausdehnungsthermometer die relative Verschiebung zweier Metallstäbe als Maß für die Temperatur genutzt wird, findet beim Bimetallthermometer eine Umwandlung der Meßgröße Temperatur in eine Krümmung eines Bimetallstreifens Anwendung. Metallthermometer werden wegen ihrer relativ großen Anzeigetragheit und Meßgenauigkeit weniger zur analogen Temperaturanzeige als vielmehr zur Signalisierung von Grenzwerten und zur Zweipunkt-Temperaturregelung eingesetzt.

2. Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern

Für die effektive und energiebewußte Führung von Produktionsprozessen ist es oft notwendig, die in den verschiedenen Anlagenteilen eines Betriebes gewonnenen Meßwerte in einer zentralen Meßwarte zusammenzufassen und ständig zu kontrollieren. Insbesondere die vielfältige Überwachung von Temperaturen ermöglicht einen rationellen Einsatz der benötigten Energie. Die Zusammenfassung der Meßeinrichtungen in Meßwarten bedingt jedoch eine Fernübertragung der Meßwerte.

Welche Möglichkeiten gibt es, die Temperaturmeßwerte ohne besonderen Aufwand über größere Entfernungen zu übertragen? Im folgenden wird gezeigt, wie man mit elektrischen Widerstandsthermometern dieses Problem lösen kann.

Physikalische Grundlagen

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes. Alle Festkörper lassen sich hinsichtlich ihrer Eigenschaft, dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegenzusetzen, in drei Gruppen einteilen:

- Leiter,
- Halbleiter,
- Isolator.

Der elektrische Widerstand von Festkörpern ist von mehreren Größen abhängig. Eine davon ist die Temperatur. Es gilt also

$$R = f(\vartheta).$$

Durch ein Experiment kann festgestellt werden, wie sich der Widerstand von Metallen und von Halbleiterwerkstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur ändert.

Untersuchen Sie die Abhängigkeit des Widerstandes verschiedener Metalldrähte und Halbleiterwerkstoffe von der Temperatur!

1. Vorbetrachtungen

- Welche Möglichkeiten zur Temperaturerhöhung des Metalldrahtes bzw. Halbleiters kann man anwenden?
- Wie kann man die Größe des elektrischen Widerstands ermitteln?

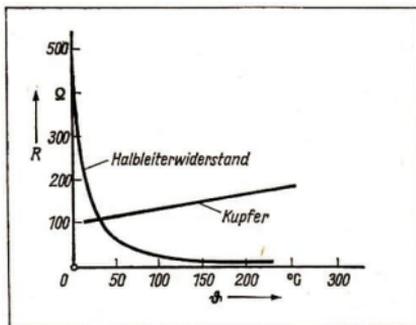
- Entwerfen Sie einen Schaltplan, um die Widerstandsänderung bei Temperaturerhöhung zu messen! Hinweis: Die Betriebsspannung ist sehr klein zu wählen, damit durch Eigenerwärmung des Metalldrahtes bzw. des Halbleiters die Meßergebnisse nicht verfälscht werden (↗ PSV 6, V 3.1.3. und V 3.1.4.).

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie das Experiment nach Ihrem Schaltplan auf! Verwenden Sie zuerst drei verschiedene Metalldrähte aus Eisen, Konstantan und Kupfer!
- Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Temperaturerhöhung, indem Sie die Metalldrähte in einem Ölbad erwärmen!
- Stellen Sie die Meßwerte in einem Diagramm grafisch dar!
- Führen Sie die gleichen Messungen mit zwei Halbleitern aus (z. B. Bleistiftmine, Kohlelektrode, Thermistor, o. ä.)!
- Fertigen Sie auch hierfür eine grafische Darstellung an!
- Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch!
- Vergleichen Sie die Widerstands-Temperaturkennlinien von Metallen und Halbleitern miteinander!

Ergebnis:

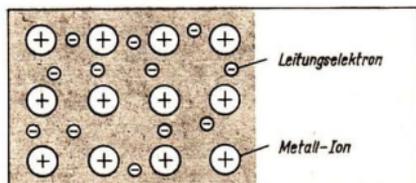
Mit steigender Temperatur wird der Widerstand von Metallen größer, der des Halbleiterwerkstoffs kleiner (Bild 37/1). Dabei ist von Bedeutung, daß bei den Metallen ein linearer Kurvenverlauf vorliegt, bei den Halbleiterwerkstoffen nicht.



37/1

Widerstandsverhalten von Metallen und Halbleitern

Metallische Leiter als Temperaturwandler. In Metallen bilden gleichartige positive Metall-Ionen ein Kristallgitter, d. h. eine regelmäßige Anordnung. Die Außenelektronen der ehemaligen freien Atome sind am Gitteraufbau nicht beteiligt, sie sind innerhalb des Metalles frei beweglich (Metallbindung). Man nennt sie Leitungselektronen. Diese Leitungselektronen sind die Ursache für die Leitfähigkeit der Metalle (Bild 37/2). Legt man an ein Metall eine Spannung an, so bewegen sich die Leitungselektronen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes vom negativen zum positiven Pol der Spannungsquelle (Richtung des Elektronenstroms). Die Gitterbausteine behindern dabei die Bewegung der Elektronen. Die gegenseitige Beeinflussung zwischen Metall-Ionen und bewegten Elektronen ist die Ursache für den elektrischen Widerstand der Metalle. Die Elektronen geben dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Gitter-



37/2 Gittermodell eines Metalls

bausteine ab. Dadurch erhöht sich deren kinetische Energie, die Schwingungen um die Nullage werden heftiger, und die Temperatur des Leiters steigt (\nearrow PhiÜb, S. 91). Man bezeichnet das als Eigenerwärmung.

Die Zunahme der kinetischen Energie der Gitterbausteine hat zur Folge, daß die Bewegung der Elektronen immer stärker behindert wird, ihre Beweglichkeit nimmt ab. Das bedeutet eine Zunahme des elektrischen Widerstands, da bei konstanter Spannung die Stromstärke kleiner wird. ①

Der gleiche Effekt tritt ein, wenn der metallische Leiter nicht nur durch den elektrischen Strom, sondern durch Zufuhr von thermischer Energie von außen erwärmt wird (Fremderwärmung).

Wird die Temperatur eines elektrischen Leiters erhöht, dann ändert sich die Wechselwirkung zwischen den Gitterbausteinen und den freien Leitungselektronen. Der elektrische Widerstand des metallischen Leiters wird größer.

Für die Widerstandsänderung ΔR eines metallischen Leiters bei einer Temperaturänderung ΔT gilt im Bereich von 0 °C bis 100 °C die Beziehung $\Delta R = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$ (7) In anderen Temperaturbereichen gilt diese Beziehung näherungsweise. α heißt Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands. R_0 ist der Anfangswiderstand. ②

Der Temperaturkoeffizient von Metallen ist sehr klein, er hat für die meisten unlegierten Metalle einen Wert von etwa $1/250 \text{ K}^{-1} = 0,4\% \cdot \text{K}^{-1}$:

Werkstoff	Cu	Al	Pt	Ni	Fe	Nickelin
α in K^{-1}	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$

Wegen der geringen Werte der Temperaturkoeffizienten ergibt sich auch eine relativ kleine Änderung des Widerstands bei Temperaturänderung.

- Welchen Widerstand hat ein Nickeldraht nach einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 100 °C, wenn sein Widerstand bei 20 °C 120 Ω betrug ?

Gegeben:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 80 \text{ K} \\ R_{20} &= 120 \Omega \\ \alpha_{\text{Ni}} &= 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

Gesucht:

$$R_{100}$$

Lösung:

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \\ R_{100} - R_{20} &= R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta T \\ R_{100} &= (R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta T) + R_{20} \\ R_{100} &= (120 \Omega \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot 80 \text{ K}) + 120 \Omega \\ \underline{\underline{R_{100} &= 180 \Omega}} \end{aligned}$$

Bei einer Temperaturerhöhung von 80 K erhöht sich der Widerstand eines Nickeldrahtes um 60 Ω . ③

Halbleiter als Temperaturwandler. Unter den Bedingungen eines ungestörten, von Verunreinigungen freien Kristallaufbaus sind bei einer Temperatur von 0 K keine frei beweglichen Ladungsträger vorhanden, der Halbleiter verhält sich wie ein Isolator. Durch Energiezufuhr (Thermische Energie, Licht, elektrische oder magnetische Felder, mechanische Kräfte) können einzelne Elektronen ihren Gitterplatz verlassen und stehen dann als wanderungsfähige Ladungsträger zur Verfügung. Gleichzeitig entstehen an den Stellen, wo die Elektronen aus der Atombindung herausgelöst wurden, sogenannte Leerstellen, die die Eigenschaften einer frei beweglichen positiven

Ladung besitzen. Diese Ladung kann durch ein Elektron ausgeglichen (kompensiert) werden, das seinerseits an anderer Stelle im Kristall eine positive Ladung hinterläßt. In der Modellvorstellung geht man davon aus, daß sich die positive Ladung von einer Stelle im Kristall zu einer anderen bewegt hat.

Frei bewegliche positive Ladungen in Halbleitern nennt man Defektelektronen oder positive Löcher.

Legt man an einen Halbleiter bei $T > 0$ K eine Spannung an, so bewegen sich die Elektronen vom negativen zum positiven Pol, die Defektelektronen bewegen sich entgegengesetzt, also vom positiven zum negativen Pol.

Erhöht man nun die Temperatur des Halbleiters (Energiezufuhr), dann steigt die Zahl der wanderungsfähigen Ladungsträger stark an. Dadurch wird die Leitfähigkeit größer, und der Widerstand wird kleiner (Bild 37/1). Die Abnahme der Beweglichkeit der Ladungsträger bei Temperaturanstieg, die bei Metallen einen entscheidenden Einfluß auf das Widerstandverhalten hat, kann beim Halbleiter vernachlässigt werden. Ihr Einfluß ist im Verhältnis zur Zunahme der Leitfähigkeit durch die stark wachsende Zahl der Ladungsträger gering.

Die Temperaturerhöhung kann wie beim metallischen Leiter entweder durch Eigenwärmerung (erhöhter Stromfluß) oder durch Energiezufuhr von außen (z. B. Kerzenflamme, Wasserbad) erreicht werden. (4) (5)

Wird die Temperatur eines Halbleiters erhöht, dann steigt die Zahl der wanderungsfähigen Ladungsträger an. Der elektrische Widerstand des Halbleiters nimmt ab.

Aus Bild 37/1 ist zu entnehmen, daß die Widerstandsabnahme eines Halbleiterwiderstandes bei Temperaturerhöhung nicht linear erfolgt. Deshalb ist auch die Gleichung für die Funktion $R = f(\theta)$ kompliziert. Den Anstieg der Kurven in Bild 37/1 nennt man Temperaturkoeffizient α . Er gibt an, in welchem Verhältnis der Widerstand bei einer bestimmten Temperaturänderung zu- oder abnimmt. Vergleicht man die Temperaturkoeffizienten von Kupfer und vom Halbleiterwiderstand miteinander, so erhält man folgendes Ergebnis:

- Metalle haben einen positiven Temperaturkoeffizienten, Halbleiterwiderstände einen negativen. (6)
- Der Temperaturkoeffizient von Metallen ist in weiten Bereichen nahezu konstant, bei Halbleiterwiderständen ändert er sich mit der Temperatur.
- Metalle haben einen kleineren Temperaturkoeffizienten als Halbleiter.

Wegen des negativen Temperaturkoeffizienten werden die Halbleiterwiderstände auch als NTC-Widerstände (NTC – Negative Temperature Coefficient) bezeichnet. Halbleiterwiderstände für Temperaturmessungen müssen einen möglichst großen Temperaturkoeffizienten haben, damit schon bei kleinen Temperaturänderungen gro-

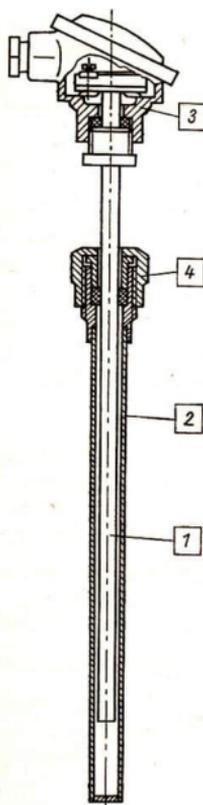
-
- ① Begründen Sie die Aussage mit Hilfe der Definitionsgleichung des elektrischen Widerstands!
 - ② Geben Sie ein Verfahren an, mit dem der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands von Metallen ermittelt werden kann!
 - ③ Der Widerstand eines Platindrahtes vergrößert sich durch Temperaturerhöhung von 60 Ω auf 150 Ω . Wie groß war der Temperaturanstieg?
 - ④ Begründen Sie, warum ein stromdurchflossener Halbleiter unter ungünstigen Bedingungen, z. B. mangelhafte Kühlung oder zu große elektrische Belastung, zerstört werden kann!
 - ⑤ Begründen Sie, warum bei Halbleiterwiderständen zur Temperaturmessung mit möglichst kleinen Strömen gearbeitet werden soll!
 - ⑥ Begründen Sie diese Aussage!

ße Widerstandsänderungen auftreten. Das erreicht man durch spezielle Materialien und einen besonderen Herstellungsprozeß. Man nennt sie auch Heißleiter. Werden sie speziell als Temperaturwandler eingesetzt (Fremderwärmung), bezeichnet man sie als Thermistoren.

Metall-Widerstandsthermometer

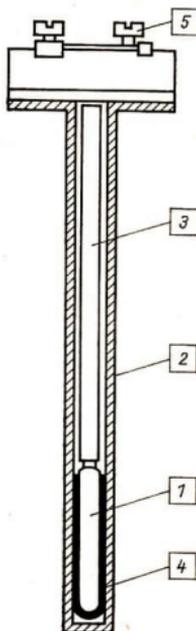
In den Rechnerräumen eines Datenverarbeitungszentrums muß für den sicheren und stabilen Betrieb der Datenverarbeitungsanlagen ein bestimmtes, gleichbleibendes Klima geschaffen werden. Das erreicht man durch Klimaregeleinrichtungen (Klimaanlagen), mit deren Hilfe neben der Temperatur auch noch die Luftfeuchtigkeit des Raumes geregelt wird. Zur Überwachung und Regelung der Temperatur haben sich in den Klimaanlagen Metall-Widerstandsthermometer bewährt, die die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Metalles bei Temperaturänderung ausnutzen.

Wie sind solche Metall-Widerstandsthermometer aufgebaut und wie funktionieren sie? Diese Frage wird im folgenden Abschnitt beantwortet.



40/1 Aufbau eines Metall-Widerstandsthermometers

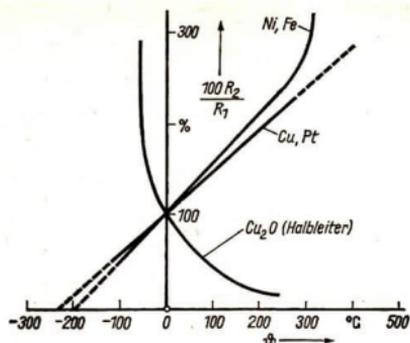
- 1 – Meßeinsatz
- 2 – äußeres Schutzrohr
- 3 – Anschlußkopf
- 4 – Verschraubung



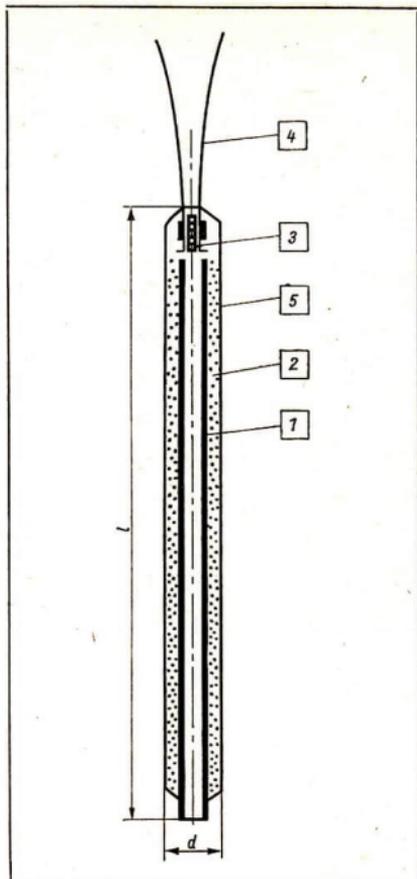
40/2

Meßeinsatz des Widerstandsthermometers

- 1 – Meßwiderstand
- 2 – inneres Schutzrohr
- 3 – Isolierung
- 4 – Kupfergaze zur guten Wärmeleitung zwischen Meßwiderstand und innerem Schutzrohr
- 5 – Anschlußklemmen



41/1 Widerstands-Temperatur-Verlauf von praktisch genutzten Leitermaterialien ($\Delta R = R_2 - R_1$)



41/2 Aufbau eines Meßwiderstandes

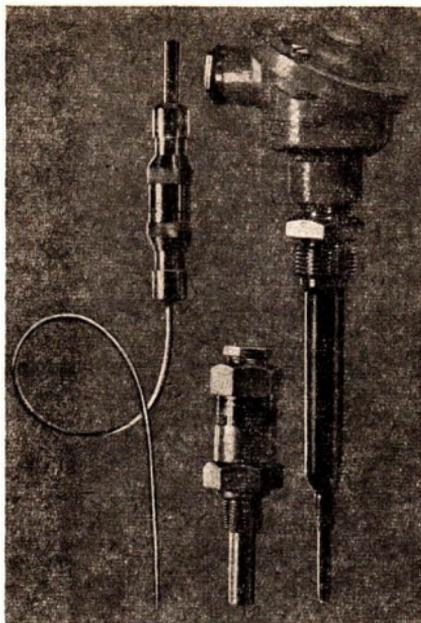
- 1 — Keramik- oder Hartglasrohr
- 2 — Widerstandsdrahtwicklung
- 3 — Befestigung der Anschlußdrähte
- 4 — Anschlußdrähte
- 5 — Schutzüberzug aus Keramik

Aufbau eines Metallwiderstandsthermometers. Ein Widerstandsthermometer besteht aus dem Meßeinsatz, dem äußeren Schutzrohr und dem Anschlußkopf (Bild 40/1). Der Meßeinsatz wird aus dem Meßwiderstand, den isolierten Zuleitungen und dem inneren Schutzrohr gebildet (Bild 40/2). Für die Widerstandwicklung des Meßwiderstandes wird meistens Platin oder Nickel verwendet, da diese folgende Forderungen am besten erfüllen:

- relativ hoher, von der Temperatur weitgehend unabhängiger Temperaturkoeffizient α ,
- nahezu lineares Verhalten für $R = f(\vartheta)$ (Bild 41/1),
- hoher spezifischer elektrischer Widerstand,
- hohe mechanische und chemische Widerstandsfähigkeit.

Den prinzipiellen Aufbau eines Meßwiderstandes zeigt Bild 41/2.

Die Meßwiderstände sind standardisiert. Ihr Normwiderstand beträgt $100 \Omega \pm 0,1 \Omega$



42/1
 Metallwiderstandsthermometer des
 VEB Thermometerwerk Geraberg
 a) Kombiniertes Widerstandsthermometer
 b) Einschraub-Widerstandsthermometer
 c) kleines Einschraubwiderstandsthermo-
 meter

bei 0 °C. Vom VEB Thermometerwerk Geraberg werden folgende Meßwiderstände hergestellt:

- Platin-Meßwiderstand mit Trägerkörper aus Hartglas oder Keramik für den Meßbereich von -220 °C bis $+550\text{ °C}$; Abmessung: 4 mm Durchmesser und 60 mm Länge.
- Nickel-Meßwiderstand mit Keramikkörper für den Meßbereich von -60 °C bis $+180\text{ °C}$; Abmessung: 9 mm Durchmesser und 100 mm Länge.
- Kupfer-Meßwiderstand mit Trägerkörper aus Bakelit für den Meßbereich von -40 °C bis $+120\text{ °C}$; Abmessung: 12 mm Durchmesser und 150 mm Länge.

Im Metall-Widerstandsthermometer wird die Meßgröße Temperatur in eine Widerstandsänderung umgewandelt.

Die praktische Ausführung von Widerstandsthermometern zeigt Bild 42/1. ①

Temperaturmeßeinrichtung mit Metall-Widerstandsthermometer.

Zu einer kompletten Temperaturmeßeinrichtung gehören

- das Widerstandsthermometer
- die Fernleitung
- der Abgleichwiderstand
- das elektrische Meßgerät
- die Spannungsquelle.

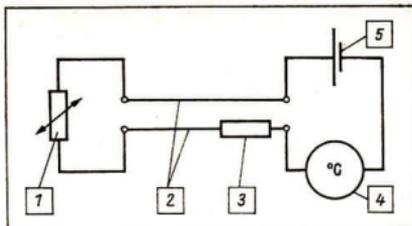
In der Praxis werden verschiedene Meßschaltungen eingesetzt:

Die Ausschlagschaltung mit Drehspulmeßwerk zeigt Bild 43/1. Sie stellt die einfachste Möglichkeit dar, den durch Temperatureinfluß veränderlichen Widerstand meßtechnisch zu erfassen. ②

43/1

Ausschlagschaltung mit Drehspulmeßwerk

- 1 – Widerstandsthermometer
 2 – Fernleitung
 3 – Abgleichwiderstand
 4 – Anzeigerät
 5 – Spannungsquelle



Das Anzeigerät ist ein in $^{\circ}\text{C}$ geeichtes Strommeßgerät. Da durch den Strom im Meßwiderstand eine Eigenerwärmung auftritt, wird in der Praxis der Meßstrom auf 10 mA begrenzt. Dadurch wird der Meßfehler nicht zu groß. Bei einer Temperatur von 0°C liegt z. B. die Eigenerwärmung bei einer Meßstromstärke von 10 mA je nach Wärmeübergang zum Meßmedium zwischen $0,1^{\circ}\text{C}$ und 1°C .

Zur Eichung der Anzeigeräte sind neben der Standardisierung des Meßwiderstandes ($100\ \Omega$ bei 0°C) auch der Widerstand der Fernleitung und die Spannungsquelle standardisiert worden. So muß die Betriebsspannung $U = 6\ \text{V}$ und der Widerstand der Fernleitung $R = 10\ \Omega$ betragen. Ist der vorhandene Leitungswiderstand kleiner, z. B. nur $4\ \Omega$, wird der Restwert von $6\ \Omega$ mit dem Abgleichwiderstand eingestellt (Bild 43/1).

Die Meßschaltung mit Drehspulmeßwerk ist zwar sehr einfach, hat aber auch große Nachteile. So ist die Empfindlichkeit für eine große Anzahl von in der Praxis anfallenden Temperaturmessungen zu gering, da durch den kleinen Temperaturkoeffizienten nur geringe Widerstandsänderungen auftreten.

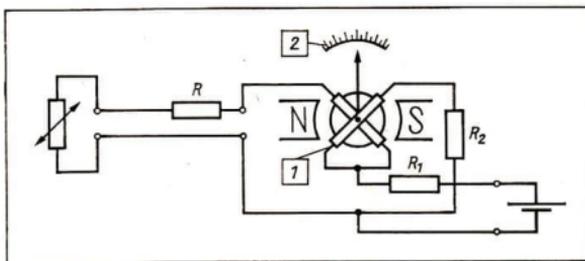
Sie beträgt nach Gleichung (7) $E = R_0 \cdot \alpha$.

Spannungsschwankungen verfälschen das Meßergebnis erheblich. Deshalb muß die Spannungsquelle stabilisiert werden, d. h., sie muß so beschaffen sein, daß sie unabhängig von den Schwankungen der Spannung im Leitungsnetz eine konstante Ausgangsspannung liefert. Mit steigender Temperatur wird der Zeigerausschlag kleiner. Der Nullpunkt für das in $^{\circ}\text{C}$ geeichte Anzeigerät wird deshalb am rechten Ende der Skale angebracht.

Eine empfindlichere Meßschaltung stellt die Zweileiterschaltung mit Kreuzspulmeßwerk dar. Sie wird in der Praxis am häufigsten angewendet. Bild 43/2 zeigt das Prinzip dieser Schaltung.

43/2 Zweileiterschaltung mit Kreuzspulmeßwerk

- 1 – Kreuzspulmeßwerk mit Zeiger
 2 – Skale, in $^{\circ}\text{C}$ geeicht
 R_1, R_2 – Abgleichwiderstände des Meßwerkes
 R – Abgleichwiderstand der Fernleitung

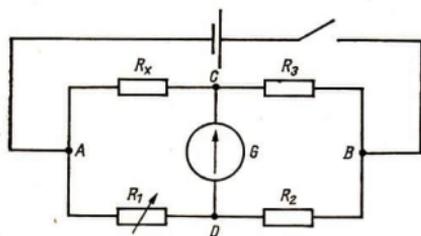


- ① Begründen Sie anhand des ohmschen Gesetzes, daß man die Widerstandsänderung mit Hilfe einer Spannungsquelle und eines Strommeßgerätes messen kann!
- ② Erläutern Sie die Wirkungsweise der Ausschlagschaltung mit Drehspulmeßwerk anhand Bild 43/1!

Das Kreuzspulmeßwerk setzt sich aus zwei unter einem bestimmten Winkel gekreuzten Spulen zusammen. Der Ausschlag des Zeigers ist deshalb im Unterschied zum einfachen Drehspulmeßwerk proportional dem Verhältnis der Stromstärken in den beiden Spulen. Bei der Temperaturmessung wird gemäß Bild 43/2 einmal die Stromstärke (Spule 1) und zum anderen die Spannung am temperaturabhängigen Widerstand (Spule 2) gemessen, so daß durch das Gesamtmeßwerk die Größe dieses Widerstandes angezeigt wird. Die beiden an die Spulen angeschlossenen Stromkreise werden durch die Abgleichwiderstände R_1 und R_2 so abgeglichen, daß für einen bestimmten Temperaturwert (z. B. 0 °C) der Quotient der beiden Stromstärken gleich Null ist. Ändert sich mit der Temperatur der Widerstand des Thermometers, so ändert sich der Spulenstrom in einer der Kreuzspulen, und das Instrument schlägt proportional zur Widerstands- und damit zur Temperaturänderung aus.

Der große Vorteil des Kreuzspulmeßwerkes besteht darin, daß Schwankungen der Speisespannung bis zu 15% keinerlei Einfluß auf die Anzeige haben, da von dem Instrument immer der Quotient der Stromstärke angezeigt wird. Nachteilig wirken sich bei langen Zuleitungen, die starken Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, die dadurch hervorgerufenen Widerstandsänderungen auf die Genauigkeit der Meßergebnisse aus. Außerdem ist der Eigenenergieverbrauch eines Kreuzspulmeßgerätes sehr hoch.

Noch empfindlicher sind **Brückenschaltungen**. Man unterscheidet dabei das Ausschlagverfahren und das Nullabgleichs- oder Kompensationsverfahren. Das Prinzip einer Brückenschaltung zeigt Bild 44/1.



44/1 Schaltskizze einer Brückenschaltung

Für die stromlose Brücke CD (Stromstärkemeßgerät zeigt keinen Ausschlag) gilt die Beziehung

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \quad (8)$$

①

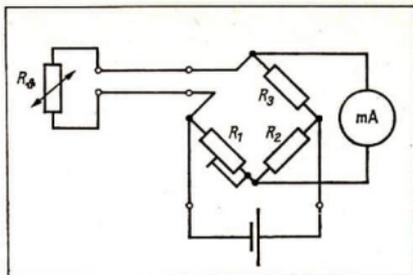
Beim **Ausschlagverfahren** wird zu Beginn der Messung der Zeiger des Anzeigeegerätes mit Hilfe von R_1 auf Null eingeregelt. Tritt nun durch Temperaturänderung eine Änderung des Widerstandes $R_x = R_\theta$ auf, dann ändert sich der Strom in der Brücke proportional zum Widerstand. Damit wird der Ausschlag des Zeigers des Stromstärkemeßgerätes zum Maß für die Temperatur und kann in °C geeicht werden (Bild 45/1).

Nachteil dieser Schaltung ist die Notwendigkeit einer stabilisierten Spannungsquelle, da sich die Brücke nicht im Gleichgewicht (stromloser Zustand) befindet und damit die Spannung in die Messung eingeht.

Beim **Nullabgleichs- bzw. Kompensationsverfahren** tritt dieser Nachteil nicht auf. Das Meßprinzip besteht darin, daß nach einer Veränderung des Widerstandes R_θ durch

45/1

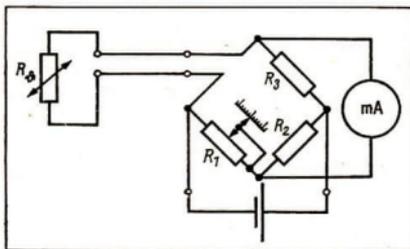
Brückenschaltung nach dem Ausschlagverfahren



Temperaturänderung die Brücke durch Veränderung des Widerstandes R_1 abgeglichen wird, d. h. am Stromstärkemesser wird kein Strom angezeigt. Ein Ablesen der Temperatur kann dann auf einer entsprechend geeichten Skale des veränderlichen Widerstandes R_1 erfolgen (Bild 45/2). Ein weiterer wesentlicher Vorzug des Kompensationsverfahrens besteht darin, daß die Temperaturmessung leistungslos vorgenommen wird, d. h., daß bei der Messung im abgeglichenen Zustand kein Strom fließt und daher Änderungen im Widerstand des Meßkreises durch Temperaturschwankungen an der Fernleitung keinen Einfluß auf das Meßergebnis haben. Die Verstellung des Widerstandes R_1 erfolgt für Labormessungen oder für Einzelmessungen in der Betriebsmeßtechnik von Hand. Für viele Messungen werden jedoch selbständige Abgleich-

45/2

Brückenschaltung nach dem Kompensationsverfahren



richtungen verwendet, sogenannte Motorkompensatoren. Der Abgleich der Brücke erfolgt dabei durch einen Elektromotor, der durch den Brückenstrom gesteuert wird und der den Schleifkontakt von R_1 entsprechend bewegt. Über ein mechanisches Anzeigesystem (Zahnrad und Zeiger) kann man dann die Temperatur ablesen. Bei Brückenschaltungen beträgt die Meßunsicherheit $\pm 0,5\%$.

Eine Temperaturmeßeinrichtung mit einem Metall-Widerstandsthermometer besteht aus dem Widerstandsthermometer, der Fernleitung, dem elektrischen Meßgerät und der Spannungsquelle. In der Technik werden vor allem Meßschaltungen mit einem Kreuzspulmeßwerk und die Brückenschaltung mit Drehspulmeßwerk eingesetzt.

- ① Bereiten Sie einen Vortrag über die physikalischen Grundlagen einer Brückenschaltung vor!

Leiten Sie die Beziehung $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ her!

Alle Varianten der Anzeigergeräte können auch mit Maximum- und Minimumgrenzkontakten ausgerüstet werden, so daß zusätzlich Signalisierungen, Steuerungen und einfache Zweipunktregelungen ermöglicht werden.

Neben den anzeigenden Geräten gibt es noch registrierende Temperaturmeßgeräte, die ähnlich wie beim Thermografen den Temperaturverlauf über einen bestimmten Zeitraum aufzeichnen. Meistens werden sie in Verbindung mit Motorkompensatoren eingesetzt.

In letzter Zeit setzen sich auch immer mehr elektronische digitale Anzeigergeräte durch. Das sind Digitalvoltmeter, die Gleichspannungs-, Stromstärke- und Widerstandsmessungen ermöglichen. Der große Vorteil besteht darin, daß durch den Anschluß von weiteren Funktionseinheiten die Registrierung, Speicherung und Auswertung der Meßwerte vorgenommen werden kann. Z. B. wird durch den Anschluß eines Prozeßrechners die zentrale Erfassung, Bewertung und Korrektur von Meßwerten, die Berechnung von technischen, technologischen und ökonomischen Daten sowie die Signalisierung und Registrierung von Grenzwertüberschreitungen ermöglicht. Damit können durch den Einsatz der Mikroelektronik viele Produktionsprozesse effektiver geführt und vorhandene Reserven zur Energieeinsparung besser genutzt werden.

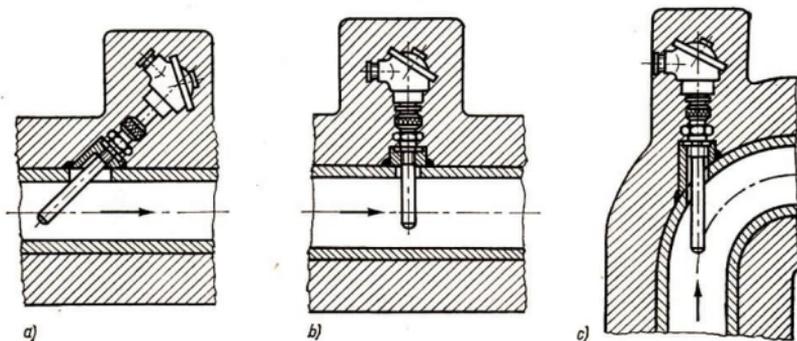
Anwendung der Metall-Widerstandsthermometer. Wegen ihrer guten Eigenschaften (hohe Meßgenauigkeit, gute Möglichkeiten der Meßbereichswahl, einfache Übertragung der Meßwerte über große Entfernungen) werden Metall-Widerstandsthermometer in der Praxis sehr vielfältig eingesetzt. Außerdem besteht die Möglichkeit des Auswechselns defekter Meßwiderstände auch während des Betriebes, da die Temperaturfühler mit auswechselbaren Meßeinsätzen ausgerüstet sind.

Die richtige Temperaturanzeige ist in starkem Maße abhängig vom Material des äußeren Schutzrohres und vom richtigen Einbau des Temperaturfühlers.

Bei der Temperaturmessung in Rohrleitungen, Luft- und Gaskanälen verwendet man Widerstandsthermometer mit Schutzrohren aus Stahl. Die Temperaturfühler haben eine Länge von 160 mm oder 250 mm und werden in die Rohrleitung eingeschraubt oder eingeschweißt (Hochdruckdampf). Dabei werden 3 verschiedene Einbauarten eingesetzt (Bild 46/1). Bei nicht isolierten Rohrleitungen bilden sich zwischen der

46/1 Einbau von Temperaturfühlern in Rohrleitungen

- a) schräg zur Strömungsrichtung
- b) senkrecht zur Strömungsrichtung
- c) axial in Krümmer



Temperatur des Meßmediums und der Rohrwandung Differenzen, die zu erheblichen Meßfehlern führen. Unterstützt wird die Fehlanzeige durch die während des Betriebes auftretende Wirbelbildung, die jedoch beim Einbau nach Bild 46/1c klein gehalten werden kann. Im Interesse einer genauen Messung und geringen Anzeigeverzögerung soll man den Temperaturfühler möglichst an einer Stelle einbauen, wo mit großen Strömungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeiten oder Dämpfe zu rechnen ist. Neben der reinen Anzeige können die Meßwerte auch zur Regelung des Durchflusses in der Rohrleitung genutzt werden. Z. B. ist in einer Molkereianlage zum Pasteurisieren von Milch eine Mindesttemperatur von 72 °C notwendig. Sinkt die Temperatur in der Anlage unter diesen Wert, dann wird der Durchlauf der Milch so geregelt, daß sie wieder in den Ausgangsbehälter zurückfließt. Erst wenn die Milchttemperatur wieder auf 72 °C gestiegen ist, erfolgt die Weiterverarbeitung.

Weit verbreitet ist die **Temperaturmessung** mit Widerstandsthermometern in **Räumen**. Bei der zentralen Überwachung von Raumtemperaturen in Kühl- und Lagerräumen, in Schulen, Krankenhäusern und Konzertsälen verwendet man Widerstandsthermometer mit Platin-, Nickel- oder Kupferwicklung. Diese Widerstandskörper werden in Metallkästen mit perforierten Blechen untergebracht und zusätzlich mit einem kleinen Quecksilber-Glasthermometer ausgestattet, um auch eine Ortsablesung zu ermöglichen. Beide Thermometer sind im Raum so anzubringen, daß sie nicht im Bereich von Heizungskörpern oder Kühlelementen liegen oder von der Sonne beschienen werden. Der Abstand von einer Wand muß außerdem so groß gewählt werden, daß keine Meßfehler durch Kälte- oder Wärmestrahlung entstehen können.

Zur **Temperaturmessung in festen Körpern und an Oberflächen** werden kleine Einschraubwiderstandsthermometer (Bild 42/1c) genutzt. Anwendungsbeispiele sind die Temperaturmessungen in dampf- oder elektrisch beheizten Plattenpressen und in Gleit- bzw. Wälzlagern.

Vom VEB Thermometerwerk Geraberg werden auch Einsteck-Widerstandsthermometer zur Temperaturmessung in Gefrierfleisch, Getreide u. ä. hergestellt.

Zusammenfassung

Metall-Widerstandsthermometer bestehen aus einem Meßwiderstand aus Platin, Nickel oder Kupfer, der in einem Schutzrohr mit Anschlußkopf untergebracht ist. Ihr Wirkprinzip beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstands dieser Metalle in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Temperatur wird in eine Widerstandsänderung umgewandelt. Diese Widerstandsänderung wird mit in °C geeichten Kreuzspulmeßwerken oder mit Brückenschaltungen gemessen. Widerstandsthermometer und Anzeigerät sind durch eine elektrische Fernleitung verbunden.

Halbleiter-Widerstandsthermometer

In vielen Personenkraftfahrzeugen wird der Verbrennungsmotor mit Wasser gekühlt. Für den wirtschaftlichen und störungsfreien Betrieb des PKW ist es notwendig, die Betriebstemperatur des Motors ständig zu messen und zu kontrollieren. Dazu reicht im allgemeinen die Messung der Kühlwassertemperatur aus, die mit Hilfe von Halbleiter-Widerstandsthermometern vorgenommen wird. Hier wird die Änderung des elektrischen Widerstands von Halbleiterwerkstoffen bei Temperaturänderung ausgenutzt.

Welche Geräte gehören nun zu einer Temperaturmeßeinrichtung mit Halbleiter-Widerstandsthermometer?

Aufbau eines Halbleiter-Widerstandsthermometers. Halbleiter-Widerstandsthermome-

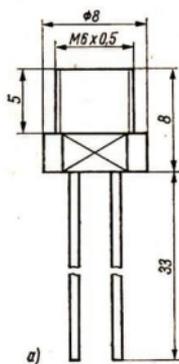
ter bestehen entweder aus Germanium oder aus einem speziellen keramischen Werkstoff, der Nickel-, Kohlen- und Magnesiumoxid enthält. Durch bestimmte Mischungsverhältnisse dieser Oxide erreicht man große Temperaturkoeffizienten, die weit über denen der Metall-Widerstandsthermometer liegen.

Mit Halbleiter-Widerstandsthermometern kann man Temperaturen im Bereich von $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$ messen. Daneben haben sich bestimmte Halbleiterwiderstände für Temperaturmessungen im Gebiet sehr tiefer Temperaturen (bis zu 1 K herab) als sehr geeignet erwiesen.

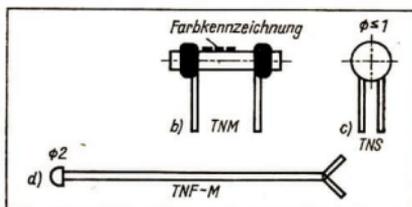
Vom VEB Keramische Werke Hermsdorf werden Thermistoren verschiedener Bauformen hergestellt:

- TNK-Typenreihe: Kompensationsthermistoren (Bild 48/1a)
- TNM-Typenreihe: Meßthermistoren (Bild 48/1b)
- TNS-Typenreihe: Spezialthermistoren (Bild 48/1c)
- TNF-Typenreihe: Thermistoren in Fühlerform (Bild 48/1d).

48/1 Bauformen verschiedener Heißleiter



- a) Typ TNK-B (Einsatzbereich bis $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- b) Typ TNM (Einsatzbereich bis $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- c) Typ TNS (Einsatzbereich bis $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- d) Typ TNF-M (Einsatzbereich bis $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Durch die zum Teil sehr kleinen Abmessungen der Thermistoren in Stäbchenform oder Scheibenform (teilweise kleiner als ein Stecknadelkopf) und der damit verbundenen geringen zu erwärmenden Masse besitzen sie eine sehr kurze Einstellzeit. Nach etwa 5 Sekunden ist beim Eintauchen in Wasser und nach etwa 9 Sekunden beim Anbringen an Metalloberflächen die Messung möglich.

Zur Kennzeichnung des Widerstandswertes eines Thermistors wird meistens der Begriff Kaltwiderstand R_{20} verwendet. Das ist der Widerstandswert bei der Raumtemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bild 49/1 zeigt den Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur für einen Thermistor vom Typ TNM mit $R_{20} = 1\text{ k}\Omega$. Unterhalb $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ steigt der Widerstand stark an (z. B. bei $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 30\text{ k}\Omega$), während er bei $+250\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 5\text{ }\Omega$ beträgt.

Thermistoren gleichen Typs weisen untereinander große Abweichungen im Widerstands-nennwert des Kaltwiderstands R_{20} und im Temperaturkoeffizienten auf. Diese Streuung bezeichnet man als Exemplarstreuung. Die Toleranzen betragen bei Standardausführungen $\pm 20\%$. Der Einsatz eines Thermistors in einem Widerstandsthermometer erfordert somit für genaue Messungen eine genaue Bestimmung der Widerstands-Temperatur-Kennlinie. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß der Temperaturverlauf des Thermistors nicht linear erfolgt, d. h. daß der Temperaturkoeffizient

Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines Thermistors mit $R_{20} = 1 \text{ k}\Omega$

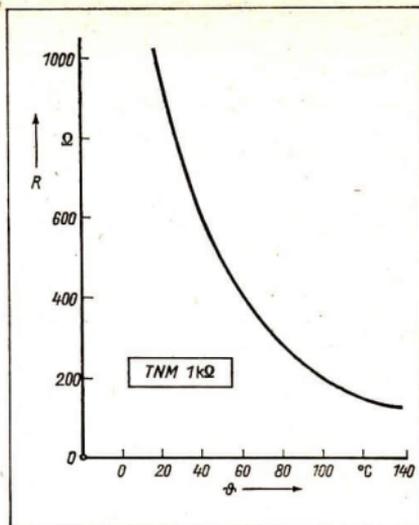
temperaturabhängig ist. Außerdem führt die Alterung des Thermistors zur Veränderung der Widerstands-nennwerte und der Temperaturkoeffizienten.

Temperaturmeßeinrichtung mit Halbleiter-Widerstandsthermometer. Zu einer kompletten Temperaturmeßeinrichtung gehören die gleichen Geräte und Bauelemente wie beim Metall-Widerstandsthermometer. Eine Ausnahme bildet der Abgleichwiderstand, da aufgrund des hohen Eigenwiderstandes des Thermistors der Widerstand der Fernleitung vernachlässigbar klein wird. Der Abgleichwiderstand kann also wegfallen.

Auch die verschiedenen Meßschaltungen sind für Metall- und Halbleiterwiderstandsthermometer die gleichen. Allerdings können aufgrund der wesentlich

größeren Temperaturkoeffizienten der Halbleiter-Widerstandsthermometer robustere Anzeigegeräte und kleinere Meßbereiche verwendet werden. ^①

Durch den hohen Eigenwiderstand des Thermistors muß beim Anschluß an Kreuzspulmeßwerke eine höhere Spannung als beim Metall-Widerstandsthermometer eingesetzt werden. Allerdings ist auch hier zu beachten, daß die Meßspannung so klein gehalten werden muß, daß der durch den Thermistor fließende Strom diesen nicht erwärmt (Eigenerwärmung).



Bauen Sie eine Temperaturmeßeinrichtung mit einem Thermistor in Ausschlagschaltung auf und eichen Sie diese! Berechnen Sie die Empfindlichkeit des Halbleiter-Widerstandsthermometers!

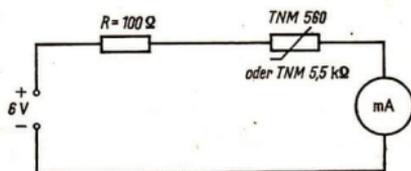
1. Vorbetrachtungen

- Informieren Sie sich in den Anleitungsheften zum SEG Elektrik und zum Elektronikbaukasten Stufe 5 über die Daten der darin enthaltenen Thermistoren!
- Wie kann man die Empfindlichkeit von Halbleiter-Widerstandsthermometern berechnen?

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie das Experiment entsprechend Bild 49/2 auf! Verwenden Sie als Meßgerät ein Demonstrationsdrehspulinstrument!

49/2 Schaltung des Thermistors



- ① Begründen Sie, warum die Empfindlichkeit eines Halbleiter-Widerstandsthermometers größer als die des Metallwiderstandsthermometers ist!

- Überdecken Sie die mA-Skala des Instruments mit einer selbstgefertigten unbeschrifteten Pappskala!
- Führen Sie eine Eichung des Thermometers durch Vergleich mit einem Flüssigkeitsthermometer durch! Teilen Sie die Pappskala in °C.

Hinweis: Beim Benutzen eines Wasserbades sollte der Thermistor in ein Reagenzglas eingeführt werden!

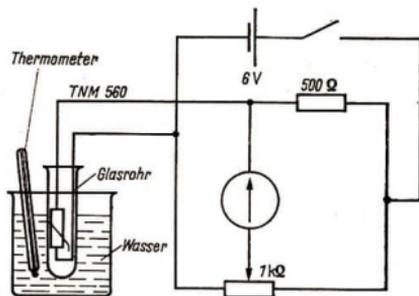
- Berechnen Sie die Empfindlichkeit der Anordnung!
- Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch!

11

Bauen Sie die gleiche Temperaturmeßanordnung in Brückenschaltung auf! Eichen Sie die Meßbrücke im Ausschlag- und im Nullabgleichverfahren in °C! Vergleichen Sie mit der Empfindlichkeit der Meßanordnung gemäß Experiment 10!

1. Vorbetrachtung

- Warum kann man die beiden Widerstände in Bild 44/1 (R_1 und R_2) durch ein Potentiometer ersetzen?
- Erläutern Sie die Meßbrückenschaltung in Bild 50/1! Wie kann man damit im Ausschlag- und im Nullabgleichverfahren die Temperatur messen?



50/1 Thermistor in einer Meßbrückenschaltung

2. Versuchsdurchführung

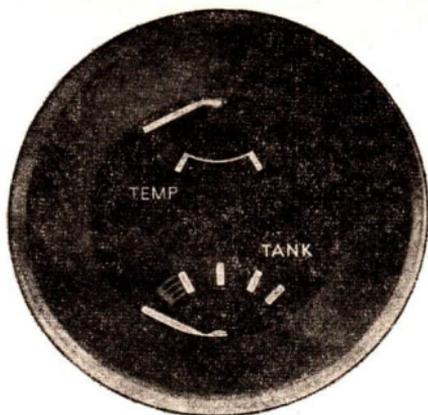
- Bauen Sie das Experiment entsprechend Bild 50/1 auf!
- Eichen Sie die Meßbrückenschaltung im Ausschlagverfahren!
- Fertigen Sie eine Pappskala für das Potentiometer an und eichen Sie die Anordnung im Nullabgleichverfahren!
- Vergleichen Sie die Empfindlichkeit der Meßanordnungen untereinander und mit der Anordnung im Experiment 10!

Eine Temperaturmeßeinrichtung mit einem Halbleiter-Widerstandsthermometer besteht aus dem Widerstandsmeßfühler (Thermistor), der Fernleitung, dem Anzeigerät und einer Spannungsquelle. In der Technik werden die gleichen Meßschaltungen wie bei Metall-Widerstandsthermometern verwendet.

Anwendung der Halbleiter-Widerstandsthermometer. Die kleinen Abmessungen der Meßfühler gestatten eine gute Anpassung an das Meßobjekt. Das wird insbesondere bei **Oberflächentemperaturmessungen** mit Scheibenthermistoren der TNK- und TNS-Typenreihe und bei „Punktmessungen“ ausgenutzt.

Zur Überwachung der **Betriebstemperatur von Verbrennungsmotoren** reicht bei kleinen Motoren (Kraftfahrzeugmotoren) meistens die Messung der Kühlwassertemperatur aus. Bei leistungsstarken Motoren (z. B. Schiffsdieselmotoren) muß außerdem noch die Kühlluft-, die Schmierstoff- und die Abgastemperatur gemessen werden. Als Meßfühler werden sogenannte Temperaturgeber benutzt, die in den jeweiligen Flüssigkeitskreislauf bzw. Luft- oder Abgaskanal eingeschraubt werden. Der Temperaturgeber besteht aus einem Schutzrohr mit Schraubgewinde, in dem sich der Thermistor befindet, und einem Anschlußkopf. Das Anzeigerät hat ein Kreuzspulmeßwerk, da z. B. die Bordspannung eines Kraftfahrzeugs nicht konstant ist. Bild 51/1 zeigt das Kühlwassertemperaturanzeigerät eines PKW „Wartburg 353 W“.

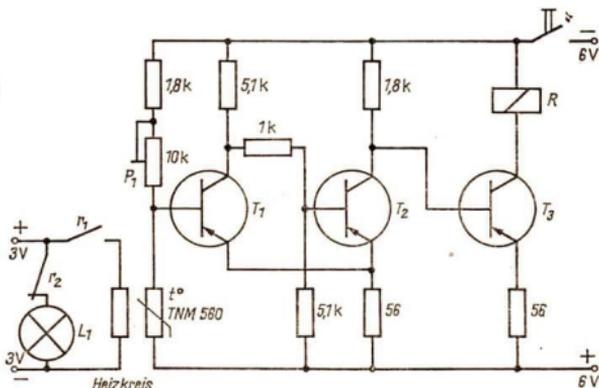
In den **Kühlzügen der Deutschen Reichsbahn** werden zur Temperaturüberwachung und -regelung in den einzelnen Kühlwagen Halbleiter-Widerstandsthermometer eingesetzt. Die Anzeige der Temperatur erfolgt zentral in einem Maschinenwagen, von dem Kabel mit Steckerkupplungen zu den Kühlwagen führen. Warum sind hierfür Halbleiter-Widerstandsthermometer besonders geeignet? Infolge des rauen Bahnbetriebes kommt es zur Korrosion und Oxydation der Kontakte in den Steckerkupplungen. Dadurch erhöhen sich die Übergangswiderstände in diesen Kupplungen, d. h., der Gesamtwiderstand der Fernleitung wird größer. Der damit verbundene Meßfehler ist jedoch sehr klein, da die Eigenwiderstände der Thermistoren in den Halbleiter-Widerstandsthermometern wesentlich größer als die erhöhten Übergangswiderstände in den Steckerkupplungen sind.



51/1 Temperaturanzeige im Kraftfahrzeug

Halbleiter-Widerstandsthermometer werden auch in Verbindung mit elektronischen Schwellenwertschaltern zur **Temperaturregelung von Wohnraumheizungen** oder elektrisch beheizten **Warmwasserbereitungsanlagen** eingesetzt (Temperaturwächter). Bild 51/2 zeigt den Schaltplan eines Temperaturwächters mit Zweipunktregelung. ①

51/2
Temperaturregelung
für eine Wohnraumheizung
 $T_1, T_2, T_3 = GC 121 D$



Bauen Sie anhand Bild 51/2 das Funktionsmodell einer Temperaturregelung mit einem Halbleiterwiderstand auf! Hinweis: Benutzen Sie die Bauelemente des Baukastensystems Elektronik Stufe 5!

Die **Messung sehr tiefer Temperaturen** hat in neuerer Zeit nicht nur für wissenschaftliche Untersuchungen, sondern auch für praktische Zwecke Bedeutung erlangt. So

- ① Beschreiben Sie anhand Bild 51/2 die Zweipunktregelung der Temperatur mit einem Thermistor!

tritt im Bereich von einigen Kelvin bei bestimmten Stoffen die sogenannte Supraleitung auf, d. h., daß diese Stoffe dann ihren elektrischen Widerstand verlieren. Für die Erzeugung sehr starker Magnetfelder oder die nahezu verlustlose Übertragung elektrischer Energie ist dieser Effekt von großer Bedeutung. Besonders die Erzeugung sehr starker Magnetfelder hat beim Aufbau von Kernfusionsanlagen schon praktischen Einsatz gefunden. Die Temperaturmessung erfolgt unter anderem auch durch Halbleiter-Widerstandsthermometer aus Kohlewiderständen, mit denen man bis in den Millikelvinbereich hinein messen kann.

Zusammenfassung

Halbleiter-Widerstandsthermometer bestehen aus speziellen Stoffen, deren elektrischer Widerstand bei Temperaturerhöhung abnimmt. Diese Widerstandsänderung kann mit Kreuzspulanzweigeräten oder mit Brückenschaltungen gemessen oder zur Zweipunktregelung der Temperatur angewandt werden.

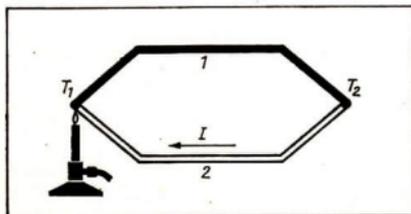
3. Temperaturmessung mit Thermoelementen

In der Metallurgie ist zur Erzeugung von Qualitätsguß die Überwachung der Temperatur in den Metallschmelzen unbedingte Voraussetzung. Falsche Gußtemperaturen führen zu starker Lunkerbildung und rauher Oberfläche. Da die Temperaturen in den Metallschmelzen sehr hoch sind (teilweise bis 1800 °C), können keine Ausdehnungs- oder Widerstandsthermometer eingesetzt werden. Hier mißt man die Temperatur mit Hilfe von Thermoelementen. Diese bieten außerdem noch den großen Vorteil, daß zur Signalgewinnung keine Hilfsenergie benötigt wird. Wie ist so ein Thermolement-Thermometer aufgebaut und wie funktioniert es? Warum wird keine Hilfsenergie benötigt? Diese Fragen sollen im folgenden beantwortet werden.

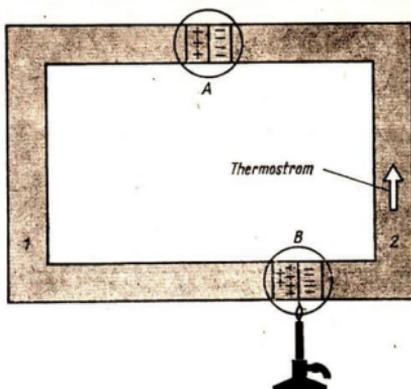
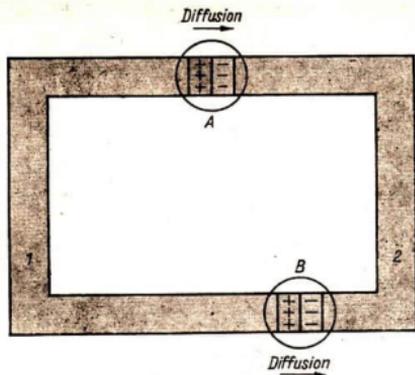
Physikalische Grundlagen

Thermoelektrischer Effekt. Verbindet man zwei verschiedene Metalle fest miteinander und erwärmt eine der Verbindungsstellen, dann fließt in dem Leiterkreis ein elektrischer Strom (Bild 52/1). Diese Erscheinung wurde 1821 von T. J. Seebeck entdeckt und nach ihm als Seebeck-Effekt bzw. thermoelektrischer Effekt bezeichnet.

Die direkte Umwandlung der thermischen Energie in elektrische Energie ist auf folgenden Vorgang zurückzuführen: Die Atome eines einwertigen Metalls stellen jeweils ein Valenzelektron als wanderungsfähiges Elektron für den elektrischen Leitungsvorgang zur Verfügung. Die Zahl der Elektronen (Elektronenkonzentration) hängt dabei von der Zahl der Metall-Ionen im Kristallgitter ab. Werden nun zwei Metalle mit unterschiedlicher Elektronenkonzentration miteinander verbunden, dann erfolgt zwi-



52/1
Leiterkreis aus zwei verschiedenen
Metallen 1 und 2



53/1

Verbindung von zwei Metallen mit unterschiedlicher Elektronenkonzentration

- 1 — Metall mit hoher Elektronenkonzentration
- 2 — Metall mit niedriger Elektronenkonzentration

53/2

Durch Wärmezufuhr an der Verbindungsstelle B tritt zwischen den Punkten A und B eine Thermospannung auf

sehen ihnen durch Diffusion ein Elektronenausgleich. Dieser Elektronenausgleich hält solange an, bis sich an der Berührungsstelle eine Gegenspannung ausgebildet hat, die ein weiteres Diffundieren der Elektronen verhindert (Bild 53/1). Dabei tritt in dem einen Metall eine Verarmung an negativen Ladungsträgern und in dem anderen eine Zunahme an negativen Ladungsträgern auf. Zwischen beiden Metallen besteht damit eine Spannung, die als **Berührungsspannung** bezeichnet wird. ①

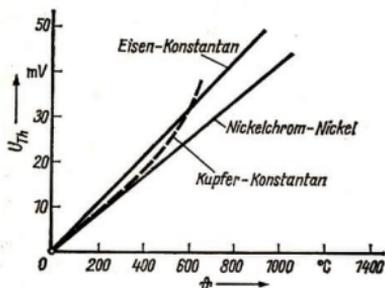
Ein elektrischer Strom kann im Leiterkreis nicht fließen, da die Berührungsspannungen in den Punkten A und B entgegengesetzt gerichtet und gleich groß sind. Erhöht man nun die Temperatur einer Verbindungsstelle durch Wärmezufuhr, dann nimmt die Diffusionsgeschwindigkeit der Elektronen und damit die Berührungsspannung an dieser Verbindungsstelle zu (Bild 53/2). Dadurch kann ein **Thermostrom** fließen, dessen Ursache die Differenz der unterschiedlichen Berührungsspannungen der beiden Verbindungsstellen darstellt. Diese Spannungsdifferenz bezeichnet man als die **Thermospannung** U_{Th} , die gesamte Anordnung als **Thermoelement**.

Die beiden Metalle, die zu einem Thermoelement miteinander verbunden sind, werden **Thermopaar** genannt.

Verbindet man zwei verschiedene Metalle miteinander und erwärmt eine der beiden Verbindungsstellen, dann tritt zwischen den Verbindungsstellen eine Thermospannung auf.

Thermoelektrische Spannungsreihe. Der Betrag der erzeugten Thermospannung hängt nur vom Stoff und von der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen ab.

- ① Begründen Sie die in Bild 53/1 dargestellte Verteilung der Ladungsträger an den Berührungsstellen A und B!



Die Dicke der Drähte oder deren elektrischer Widerstand ist für die Thermospannung nicht von Bedeutung. Es gilt

$$U_{Th} = k \cdot \Delta T. \quad (9)$$

k : Materialkonstante.

Bild 54/1 zeigt die Abhängigkeit der Thermospannung einiger Thermopaare von der Temperatur.

54/1

Thermospannungs-Temperaturkurven einiger Thermopaare

Die Thermospannung eines Thermoelementes ist der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen weitgehend proportional. Sie kann als Maß für die Temperatur verwendet werden.

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Thermospannungen verschiedener Metalle bezogen auf Platin, wobei die Temperaturen der beiden Verbindungsstellen 0 °C bzw. 100 °C betragen (Thermoelektrische Spannungsreihe):

Metall	U_{Th} in mV	Metall	U_{Th} in mV
Konstantan (45% Nickel + 55% Kupfer)	-3,4	Silber	+0,72
Nickel	-1,5	Gold	+0,75
Platin	0,0	Kupfer	+0,76
Aluminium	+0,4	Eisen	+1,80
Platin-Rhodium	+0,64	Nickel-Chrom	+2,20

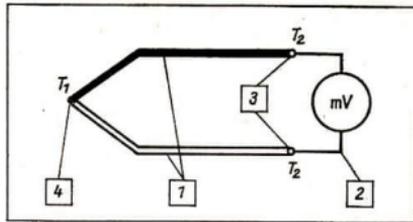
Die Thermospannung eines Thermoelements ergibt sich aus der Differenz der Einzelspannungen.

Messen der Thermospannung. Hält man die Temperatur der einen Verbindungsstelle konstant, so ist die Thermospannung nur von der Temperatur der anderen Verbindungsstelle (Meßstelle) abhängig. Die Verbindungsstelle konstanter Temperatur wird als Vergleichsstelle bezeichnet. In der Praxis wird diese Vergleichsstelle auf 0 °C, 20 °C oder 50 °C konstant gehalten. Um ein Meßgerät oder eine Fernleitung in den Stromkreis zu schalten, muß man entweder eine Verbindungsstelle oder einen der Drähte auftrennen. An der Trennstelle entstehen praktisch zwei neue Verbindungsstellen, da ein dritter Leiter, meistens Kupfer, mit dem Thermoelement in Berührung gebracht wird (Bild 55/1). Die ursprüngliche Thermospannung wird jedoch nicht beeinflusst, wenn diese beiden Verbindungsstellen gleichen Temperaturen ausgesetzt sind.

Da in der Nähe der Meßstelle diese Bedingung meistens nicht erfüllt ist, wird der Übergang auf eine Kupferleitung, d. h. die Vergleichsstelle, in einer bestimmten Ent-

55/1 Messen der Thermospannung

- 1 — Thermopaar
- 2 — Kupferleitung
- 3 — Vergleichsstelle
- 4 — Meßstelle

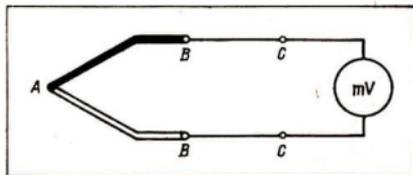


fernung von der Meßstelle angelegt. Die Verbindungsleitung zwischen Thermopaar und Vergleichsstelle muß dabei die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften haben wie das eigentliche Thermopaar. Man bezeichnet diese Leitungen als **Ausgleichsleitungen**. Als Werkstoffe für die Ausgleichsleitung kann man die gleichen wie für das Thermopaar nehmen. Lediglich bei Thermoelementen mit Platin werden aus ökonomischen Gründen Ausgleichsleitungen aus speziellen Legierungen eingesetzt (Bild 55/2). Ausgleichsleitungen werden verwendet, um an einer vom Thermoelement entfernten Stelle (Vergleichsstelle mit konstanter Temperatur) den Übergang auf eine Kupferleitung vorzunehmen.

55/2

Messen der Thermospannung mit Ausgleichsleitung

- A — Meßstelle
- BC — Ausgleichsleitung
- C — Vergleichsstelle



Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Thermospannung von der Metallkombination eines selbst hergestellten Thermoelements und von der Temperaturdifferenz!

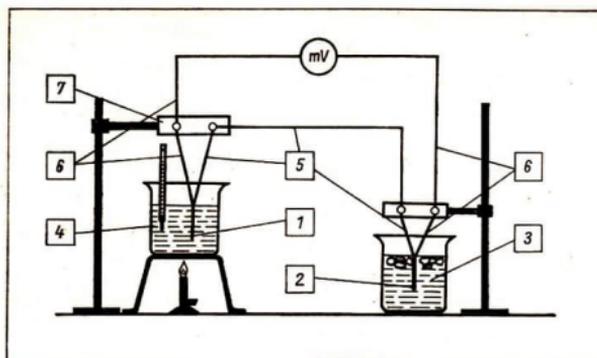
1. Vorbetrachtungen

- Warum muß beim Messen der Thermospannung eines Thermoelements eine Vergleichsstelle konstanter Temperatur eingerichtet werden?
- Weshalb sind für genaue Messungen Ausgleichsleitungen nötig?
- Welche Meßgeräte eignen sich zum Messen der geringen Thermospannung?

2. Versuchsdurchführung

- Stellen Sie ein Kupfer-Konstantan- und ein Eisen-Konstantan-Thermoelement her! Zur Herstellung des Kupfer-Konstantan-Thermoelements werden zwei Paare aus je einem miteinander verdrehten Kupfer- und Konstantandraht benötigt. Die Drähte sollen eine Länge von etwa 30 cm und einen Durchmesser von 0,3 bis 0,5 mm haben. Am verdrehten Ende (etwa 2 cm) werden die Drähte miteinander verlötet.
- Die Herstellung des Eisen-Konstantan-Thermoelements erfolgt analog.
- Bauen Sie das Experiment entspr. Bild 56/1 auf!
- Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und der Thermospannung für beide selbstgefertigten Thermoelemente!
- Stellen Sie die Meßwerte in einem Diagramm grafisch dar! ($U_{Th} = f(\Delta T)$)
- Bestimmen Sie anhand der so gewonnenen Eichkurve die Temperatur einer unbekanntenen Flüssigkeitsmenge!

① Begründen Sie diese Aussage!



56/1
Schaltung des Thermoelements

- 1 — Meßstelle
- 2 — Vergleichsstelle
- 3 — Eiswasser
- 4 — Meßflüssigkeit (Wasser, Öl)
- 5 — Konstantandraht
- 6 — Kupfer- bzw. Eisendraht
- 7 — Klemmenstange

Zusammenfassung

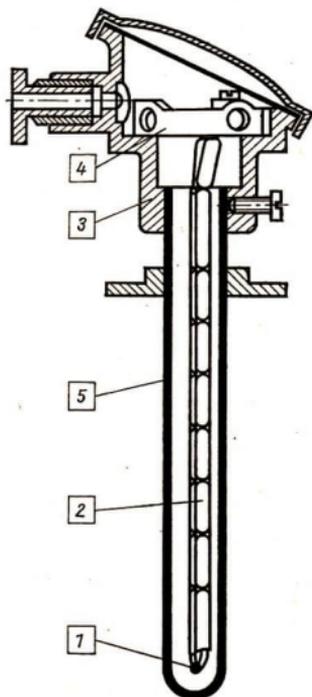
Werden zwei verschiedene Metalle miteinander verbunden und eine der beiden Verbindungsstellen erwärmt, so tritt zwischen beiden Verbindungsstellen eine Thermospannung auf (Seebeck-Effekt). Diese Thermospannung hängt von der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen und von den Materialien des Thermopaars ab. Sie kann als Maß für die Temperatur an der Meßstelle genutzt werden (Meßgrößenwandlung).

Thermoelement-Thermometer

Wie nutzt man den von Seebeck entdeckten thermoelektrischen Effekt in der Technik zur Temperaturmessung aus? Welche Werkstoffe haben sich für die Thermoelement-Thermometer besonders bewährt?

Aufbau eines Thermometers mit Thermoelement. Die technische Ausführung eines Thermoelements zeigt Bild 56/2. Das Schutzrohr soll weitgehend gasdicht sein, um unerwünschte chemische Reaktionen des Thermoelements mit Stoffen aus der Umwelt zu vermeiden. An den Anschlußschrauben wird die Ausgleichsleitung befestigt.

Die Verbindung der beiden Thermodrähte erfolgt durch Schweißen, bei niedrigen Temperaturen und geringen Anforderungen auch durch Löten. Die Thermodrähte dürfen sich nur am Arbeitsende berühren, die übrige Länge muß gut



56/2 Aufbau eines technischen Thermoelements

- 1 — Löt- oder Schweißstelle des Thermopaars
- 2 — keramische Isolierperlen oder -röhrchen
- 3 — Anschlußkopf
- 4 — Keramikeinsatz mit 2 Anschlußschrauben
- 5 — Schutzrohr

isoliert sein. Die Isolation besteht aus Schamotte- oder Porzellanröhrchen, weil diese eine hohe Temperaturbeständigkeit und eine gute chemische Widerstandsfähigkeit aufweisen. In der Praxis werden folgende Thermopaare verwendet:

Thermopaar	Temperaturbereich	mittlere Thermo- spannung bei $\Delta T = 100 \text{ K}$
Kupfer-Konstantan (Cu-Konst.)	-200 °C bis +400 °C	4,25 mV
Eisen-Konstantan (Fe-Konst.)	-200 °C bis +700 °C	5,4 mV
Nickelchrom-Nickel (NiCr-Ni)	0 °C bis +1000 °C	4,1 mV
Platinrhodium-Platin (PtRh-Pt) (10% Rhodium)	0 °C bis +1600 °C	0,8 mV
Platin-Platinrhodium 30/6 (30% Rh/70% Pt- 6% Rh/94% Pt)	0 °C bis +1800 °C	0,5 mV

Die zu Thermoelementen zu verarbeitenden Drahtmaterialien werden zur besseren Unterscheidung farbig gekennzeichnet.

Für spezielle Messungen werden sogenannte **Mantelthermoelemente** hergestellt. Sie haben Außendurchmesser von 0,15 bis 6 mm und zeichnen sich gegenüber Standard-Thermoelementen durch folgende Vorzüge aus: kleine Eigenmasse, kleine Wärmekapazität, kleine Einstellzeit, große mechanische Flexibilität, große Korrosionsbeständigkeit, große Druckfestigkeit und große Alterungsbeständigkeit. Nach-

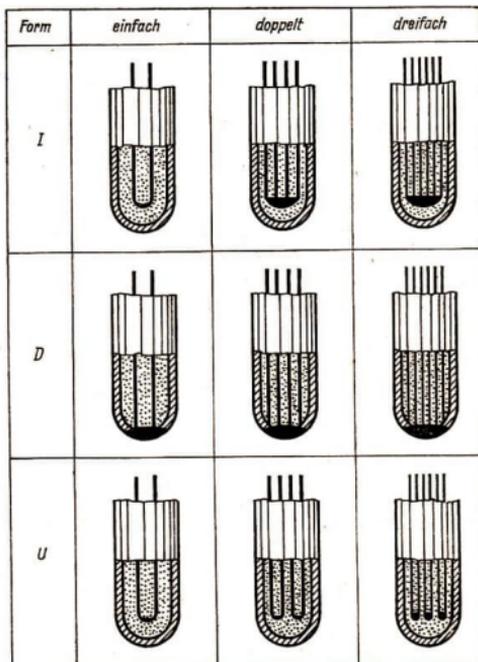
57/1

Meßstellenausführungen von Mantelthermoelementen

Form I: Meßstelle vom Mantel getrennt verschweißt und elektrisch isoliert, im Mantel gasdicht eingeschlossen

Form D: Thermopaar und Mantel fest miteinander verschweißt, deshalb hohe Ansprechempfindlichkeit

Form U: unabhängige Meßstellen



teilig wirkt sich aus, daß die Mantelthermoelemente aufgrund ihrer sehr kleinen Drahtquerschnitte große Innenwiderstände haben. ^①

Die technische Ausführung erfolgt als Einfach-, Doppel- oder Dreifachthermoelement in drei verschiedenen Formen (Bild 57/1).

Mantelthermometer werden sowohl mit als auch ohne Anschlußkopf hergestellt.

Thermoelemente zur technischen Temperaturmessung bestehen aus einem Schutzrohr, dem Thermopaar und dem Anschlußkopf.

Temperaturmeßeinrichtung mit Thermoelement. Zur Messung der Thermospannung gibt es zwei Meßschaltungen.

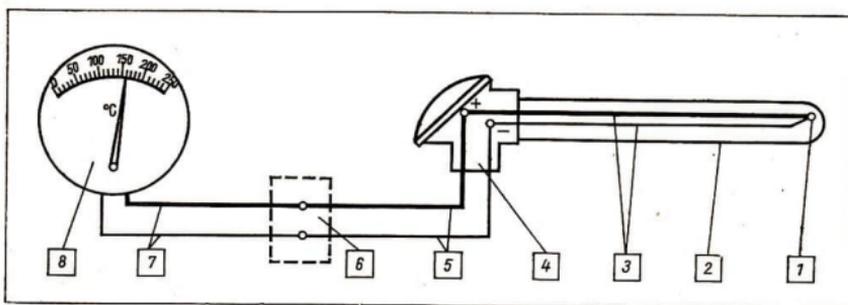
Das Prinzip der Ausschlagschaltung zeigt Bild 58/1. Diese Meßschaltung ist einfach im Aufbau und deshalb sehr verbreitet. ^②

Wird für die Temperaturmessung keine große Genauigkeit verlangt, kann man die Ausgleichsleitung weglassen. Die Vergleichsstelle liegt dann im Anschlußkopf des Thermoelements. ^③

Für genaue Messungen muß die Vergleichsstelle verlegt werden. Dazu ist eine Ausgleichsleitung zu verwenden, die so lang gewählt wird, daß man eine Stelle erreicht, an der annähernd konstante Raumtemperatur herrscht. Die normale Länge ist 3 m, es kann aber auch jede andere Länge verwendet werden. In der Praxis werden drei standardisierte Ausgleichsleitungen hergestellt, die mit Asbest isoliert sind. Beim Verlegen der Leitung ist unbedingt auf die richtige Polung zu achten, da sonst zusätzliche Fehler auftreten. Dazu ist der Pluspol der Ausgleichsleitung mit einem roten Faden gekennzeichnet. ^④

Ist es nicht möglich, für die Vergleichsstelle einen Ort konstanter Raumtemperatur zu finden, dann muß an dieser Verbindungsstelle die Temperatur durch einen Thermostat konstant gehalten werden. Dieses Zusatzgerät arbeitet nach dem Prinzip der Zweipunkt-Temperaturregelung mit einem Flüssigkeitskontaktthermometer und ist auf eine Solltemperatur von 50 °C eingestellt. In großen Anlagen können bis zu 50 Vergleichsstellen in einem Thermostaten untergebracht werden.

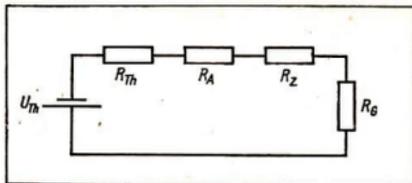
Beim Eichen des Anzeigergerätes muß berücksichtigt werden, daß an den Anschlußklemmen des Gerätes nicht die volle Thermospannung anliegt. An den Widerständen des Thermopaars, der Ausgleichsleitung und der Zuleitung treten Teilspannungen



58/1 Prinzip der Ausschlagschaltung mit einem Thermoelement

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1 — Meßstelle | 5 — Ausgleichsleitung |
| 2 — Schutzrohr | 6 — Vergleichsstelle |
| 3 — Thermopaar | 7 — Zuleitung |
| 4 — Anschlußstelle der Ausgleichsleitung | 8 — Millivoltmeter, in °C geeicht |

Ersatzschaltbild einer Ausschlagschaltung

 U_{Th} – Thermospannung R_{Th} – Innenwiderstand des Thermoelements R_A – Widerstand der Ausgleichsleitung R_z – Widerstand der Kupferzuleitung R_G – Innenwiderstand des Anzeigerätes

auf (Bild 59/1). In der Praxis verfährt man so, daß die Eichung des Anzeigerätes für einen bestimmten Widerstand von Thermoelement, Ausgleichsleitung und Kupferleitung erfolgt. Im allgemeinen beträgt dieser Widerstand 10Ω bzw. 20Ω und wird mit Abgleichwiderständen in der Fernleitung eingestellt. Bei den dünnen Thermo-paaren der Mantelthermoelemente ist der Widerstand des Thermoelements sehr groß. Um hier Meßfehler zu vermeiden, muß der Innenwiderstand des Anzeigerätes möglichst groß gewählt werden. Reicht die an den Anzeigeräteklemmen anliegende Spannung nicht für einen deutlichen Zeigerausschlag aus, dann muß man einen Gleichspannungsmeßverstärker einsetzen.

- Wie groß muß der Abgleichwiderstand einer Temperaturmeßschaltung mit einem Fe-Konst.-Thermoelement sein, wenn die Thermodrähte $1,20 \text{ m}$ lang, die Ausgleichsleitung 3 m lang, die Kupferfernleitung 100 m lang und das Anzeigerät auf 20Ω geeicht ist ?

Die Durchmesser der Thermodrähte und der Ausgleichsdrahte betragen jeweils $0,5 \text{ mm}$, die Kupferleitung hat einen Querschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$.

Gegeben:

$$R_{Ges} = 20 \Omega$$

$$l_{Th} = 1,20 \text{ m}$$

$$l_{Au} = 3,0 \text{ m}$$

$$l_z = 200 \text{ m}$$

$$d_{Th} = d_{Au} = 0,5 \text{ mm}$$

$$A_z = 1,5 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{Fe} = 0,10 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\rho_{Konst.} = 0,50 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\rho_{Cu} = 0,016 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Lösung:

$$R_{Ab} + R_{Th} + R_{Au} + R_z = 20 \Omega$$

$$R_{Ab} = 20 \Omega - (R_{Th} + R_{Au} + R_z)$$

$$R_{Th} = \rho_{Fe} \cdot \frac{l_{Th}}{A_{Th}} + \rho_{Konst.} \cdot \frac{l_{Th}}{A_{Th}}$$

$$R_{Th} = (\rho_{Fe} + \rho_{Konst.}) \cdot \frac{l_{Th}}{A_{Th}}$$

$$R_{Th} = \left(0,1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} + 0,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \cdot \frac{1,20 \text{ m}}{\pi \cdot 0,25^2 \text{ mm}^2}$$

$$R_{Th} = 0,6 \cdot \frac{1,20}{\pi \cdot 0,25^2} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2}$$

$$\underline{R_{Th} = 3,7 \Omega}$$

Gesucht:

$$R_{Ab}$$

- ① Welchen Einfluß kann eine große Wärmekapazität eines Thermoelements auf seine Einsatzmöglichkeiten haben ?
- ② Erläutern Sie anhand Bild 58/1 die Funktionsweise der Ausschlagschaltung!
- ③ Welchen Einfluß hat die Asbestisolation auf die elektrischen Eigenschaften der Leitung ?
- ④ Weshalb tritt bei falscher Polung der Ausgleichsleitung ein zusätzlicher Fehler auf ?

$$R_{Au} = (\rho_{Fe} + \rho_{Konst.}) \cdot \frac{l_{Au}}{A_{Au}}$$

$$R_{Au} = 0,6 \cdot \frac{3,0}{\pi \cdot 0,25^2} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2}$$

$$\underline{\underline{R_{Au} = 9,2 \Omega}}$$

$$R_Z = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_Z}{A_Z}$$

$$R_Z = 0,016 \cdot \frac{200 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}}{1,5 \text{ m} \cdot \text{mm}^2}$$

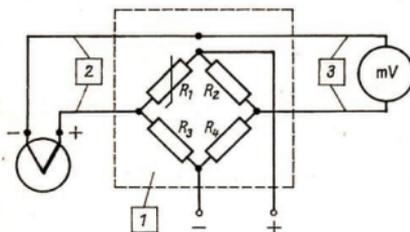
$$\underline{\underline{R_Z = 2,1 \Omega}}$$

$$R_{Ab} = 20 \Omega - (3,7 \Omega + 9,2 \Omega + 2,1 \Omega)$$

$$\underline{\underline{R_{Ab} = 5 \Omega}}$$

Der gesuchte Abgleichwiderstand muß 5 Ω betragen.

Eine andere Möglichkeit der Meßschaltung stellt die **Kompensationsschaltung** dar. Anstelle des Thermostaten wird an der Vergleichsstelle eine Kompensationsdose eingesetzt (Bild 60/1). Damit werden geringe Temperaturschwankungen an der Vergleichsstelle selbsttätig kompensiert. ① ②



60/1
Temperaturkompensationsschaltung eines
Thermoelements

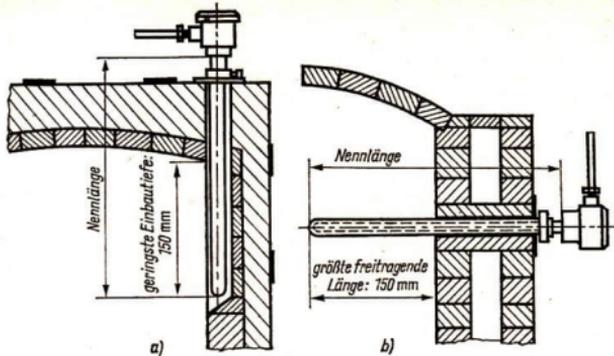
- 1 — Kompensationsdose
- 2 — Ausgleichsleitung
- 3 — Kupferfernleitung

Die Funktionsweise besteht in folgendem: In Reihe mit dem Thermoelement liegt eine Brückenschaltung mit einem temperaturempfindlichen Widerstand (z. B. Thermistor) in einem Brückenzweig (R_1). Ändert sich nun die Temperatur an der Vergleichsstelle, wird infolge der Widerstandsänderung von R_1 das Brückengleichgewicht gestört. Nur bei vorhandener Eichtemperatur besteht Gleichgewicht. R_1 ist so bemessen, daß die Diagonalspannung der Brücke die Veränderung der Thermospannung, die durch die Temperaturänderung entsteht, automatisch ausgleicht.

Eine Temperaturmeßeinrichtung mit einem Thermoelement besteht aus dem Meßfühler (Thermoelement), einer Ausgleichsleitung, der Vergleichsstelle, einer Kupferleitung und dem Anzeigerät. Für praktische Messungen werden die Ausschlag- und die Kompensationsschaltung verwendet.

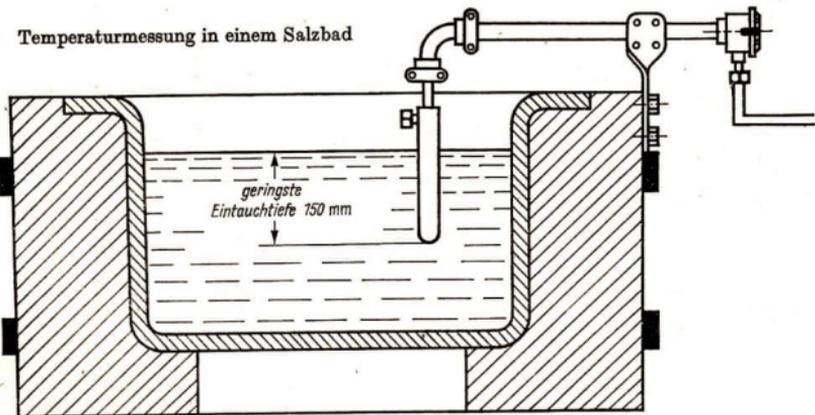
Anwendung der Thermometer mit Thermoelement. Die Temperaturmessung mit Thermoelementen hat aufgrund der großen Vorzüge in der Praxis weite Verbreitung gefunden. Insbesondere in den Bereichen, in denen andere Thermometer nicht mehr einsetzbar sind (+900 $^{\circ}\text{C}$ bis 1800 $^{\circ}\text{C}$), ermöglichen sie noch eine genaue Temperaturmessung.

61/1
 Einbau
 von Thermoelernen
 in Industrieöfen
 a) senkrechter Einbau
 b) waagerechter Einbau



Den betrieblichen Anforderungen entsprechend werden eine Vielzahl verschiedener Bauformen von Thermoelernen hergestellt. Für die Wahl des Schutzrohres und den richtigen Einbau des Meßfühlers gelten die gleichen Kriterien wie bei den Metallwiderstandsthermometern (S. 40). Bei Temperaturmessungen in mit Gas, Kohle, Öl oder elektrisch beheizten Industrieöfen (Anlaß-, Glüh- und Härteöfen) kann das Thermoelernen senkrecht oder waagrecht eingebaut werden (Bild 61/1). Der senkrechte Einbau ist besser, da beim waag-

61/2 Temperaturmessung in einem Salzbad

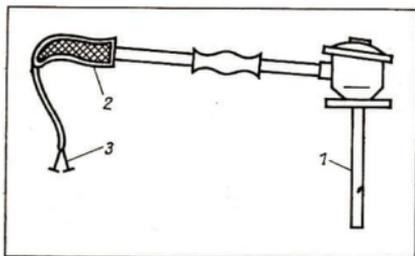


- ① Welchen Querschnitt muß die 50 m lange Kupferleitung eines Nickelchrom-Konstantan-Thermoelernen mit 10 m langer Ausgleichsleitung haben, wenn das Anzeigegerät für 100 Ω geeicht ist? Die Drahtdurchmesser der Thermodrähte betragen 0,3 mm (Länge 1,0 m) und die der Ausgleichsdrahte 1,0 mm. Ein Abgleichwiderstand ist nicht vorgesehen.
- ② Bei einer Fernmeßeinrichtung mit Thermoelernen und Drehspulmeßgerät darf der Gesamtwiderstand ohne Meßgerät 10 Ω nicht überschreiten. Das Thermoelernen hat einen Widerstand von 0,5 Ω , die Kompensationsleitung 2 Ω . Für den Abgleichwiderstand sollen mindestens 20 Ω für den Abgleichbereich vorhanden sein. Welche Drahtstärke ist mindestens einzusetzen, damit der zulässige maximale Widerstand der Übertragungsleitung bei 400 m Leitungslänge (Einfachlänge) nicht überschritten wird? Als Leitungsmaterial soll Kupfer eingesetzt werden.

rechten Einbau die Gefahr des Abknickens besteht. Als Schutzrohre werden bis 1200 °C Spezialstahlrohre und bis 1500 °C Keramikrohre eingesetzt. In Muffelöfen besteht die Gefahr, daß durch die heißen Heizgase die Elementdrähte der Thermoelemente verbrennen. Hier muß das Schutzrohr des Thermoelements vor den heißen Gasen durch eingebaute Schamottesteine geschützt werden.

Beim senkrechten Einbau des Thermoelements ist durch die aufsteigende Ofenwärme mit einer starken Erwärmung des Anschlußkopfes zu rechnen. Der Kopf darf jedoch keine höhere Temperatur als 200 °C annehmen, da sonst die angeschlossene Ausgleichleitung nicht mehr einwandfrei kompensiert. Es ist deshalb ein entsprechender Strahlungsschutz am Kopf vorzusehen.

Zur Temperaturmessung in Salzbadern benutzt man Winkel-Thermoelemente (Bild 61/2). Als Schutzrohre werden bis 900 °C einfache Stahlrohre und über 900 °C bis 1350 °C Rohre aus Spezial-Stahl eingesetzt. Bei Dauermessungen unter hohen Temperaturen ist allerdings die Lebensdauer dieser Schutzrohre recht kurz (höchstens 60 Betriebsstunden). Deshalb verwendet man oft Thermoelemente für Tauchmessungen (Bild 62/1). Porzellan- oder Schamotterohre sind wegen der mangelnden Temperaturwechselbeständigkeit für Temperaturmessungen in Salzbadern nicht geeignet.

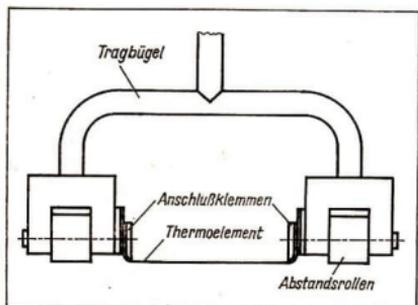


62/1
Thermoelement für Tauchmessungen

- 1 — Meßfühler
- 2 — Handgriff
- 3 — Anschlüsse

Da es für die Temperaturmessung in Metallschmelzen keine Schutzrohre für eine Dauermessung gibt, muß man sich mit kurzzeitigen Messungen begnügen. Für Zink-, Zinn-, Blei- und Aluminiumschmelzen und deren Legierungen haben sich Gußeisenschutzrohre bewährt. Man kann die Temperatur auch mit nackten Thermodrähten messen (Fe-Konst. oder NiCr-Ni). Dabei wird innerhalb von 5 s annähernd die Schmelztemperatur angezeigt.

Für die Temperaturmessung in Eisen- und Stahlschmelzen in Siemens-Martin-Öfen wurde ein Spezial-Thermoelement entwickelt. An der Meßstelle wird das Thermopaar durch ein auswechselbares Quarzröhrchen geschützt, das wiederum in einem Graphitkopf befestigt ist. Der Graphitkopf schützt das Thermoelement vor dem Angriff der Schlacke. Eine Messung in der Schmelze dauert nur etwa 14 bis 18 s. Mit einem Quarzröhrchen können höchstens zwei Messungen durchgeführt werden, dann muß man es auswechseln. Nach etwa jeder 10. Messung muß das Thermoelement, nach jeder 100. Messung der Graphitkopf erneuert werden.



62/2 Rollenmeßbügel mit Thermoelement

Zur **Temperaturmessung in Hochdruckbehältern und -rohrleitungen** von Kraftwerken werden Thermoelemente mit kegelförmigen Schutzrohren verwendet, die in den Behälter bzw. die Rohrleitung eingeschweißt werden.

Zum **Messen von Oberflächentemperaturen** an rotierenden Walzen werden Bandthermoelemente (Cu-Konst., 5 mm breit, 0,1 mm dick), die mit einem Tragbügel ausgestattet sind, angewendet. Die Meßstelle wird leicht auf die Oberfläche der rotierenden Walze aufgedrückt (Bild 62/2).

Mantel-Miniatur-Thermoelemente werden zur Temperaturmessung in den Gebieten eingesetzt, die den Standard-Thermoelementen nicht zugänglich sind:

- **Medizin und Biologie:** Temperaturmessungen am lebenden Auge, in Blutbahnen, im Gehirn, in Pflanzenstengeln und Blättern
- **Nahrungsmittelindustrie:** Temperaturmessung in Sterilisatoren, in Nahrungsmitteln und in Konservendosen
- **Reaktortechnik:** Temperaturmessung in Brennstäben und Druckkammern
- **Turbinen- und Raketentechnik:** Temperaturmessung in Gaskanälen zwischen Brennkammer und Turbinenläufer von Strahltriebwerken, Temperaturmessung in Gaskanälen von Raketen
- **Metallindustrie:** Temperaturmessung in Werkstoffen und Werkzeugen (Drehmeißel), in Lagern von Motoren
- **Kunststoff- und Textilindustrie:** Temperaturmessungen in Extrudern (Schneckenpressen), in Spinndüsen und in bewegten Nähadeln.

Doppelthermoelemente der Form U mit zwei unabhängigen Meßstellen (Bild 57/1) werden dort eingesetzt, wo neben der Temperaturmessung auch eine Temperaturregelung erfolgen soll. ①

4. Temperaturmessung mit Pyrometern

In der Glasindustrie und in Eisenhüttenbetrieben ist es zur Führung des Produktionsprozesses oftmals nötig, die sehr hohen Temperaturen der Schmelzen ständig zu überwachen. Der Einsatz von Berührungsthermometern ist für so einen Dauerbetrieb nicht möglich, da ein zu starker Verschleiß der Schutzrohre auftreten würde. Außerdem liegen die zu messenden Temperaturen teilweise über 1800 °C. Hier empfiehlt sich der Einsatz von Strahlungs-pyrometern.

Physikalische Grundlagen

Wärmestrahlung. Jeder Körper sendet eine Wärmestrahlung aus, deren Intensität von der Temperatur und von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt. Aus der Erfahrung wissen wir, daß z.B. ein Metallkörper, der erwärmt wird, zuerst rot glüht, dann über orange und gelb sich immer mehr der Weißglut nähert. Bei Temperaturen unter 600 °C sendet der Körper vorwiegend eine Infrarotstrahlung aus, die vom menschlichen Organismus als unsichtbare Wärmestrahlung empfunden wird. Oberhalb

① Stellen Sie in Tabellenform Vor- und Nachteile von Thermoelementen und Widerstandsthermometern gegenüber und grenzen Sie die Anwendungsbereiche ab!

600 °C beginnt der Körper zu glühen und sendet neben der Wärmestrahlung eine für das Auge sichtbare Strahlung aus. Zuerst ruft die Strahlung einen roten Farbeindruck hervor, bei 1200 °C einen gelben und bei noch höheren Temperaturen einen weißen Farbeindruck. Über 6000 °C wird vorwiegend ultraviolette (nicht sichtbare) Strahlung emittiert.

Die von einem Körper ausgesandte Strahlung hängt von seiner Temperatur ab.

Gesamtstrahlungspyrometer

Bei der Temperaturmessung in Glas- und Metallschmelzen wertet man die von der Schmelze ausgesandte Strahlung nahezu über den gesamten vorkommenden Farbbereich aus. Die dafür eingesetzten Meßgeräte werden als Gesamtstrahlungs-pyrometer bezeichnet. Wie sind sie aufgebaut und wie ist ihre Wirkungsweise ?

Aufbau. Der Meßkopf eines Gesamtstrahlungs-pyrometers enthält eine Objektivlinse, eine Okularlinse und einen Strahlungsempfänger. Die Objektivlinse bildet das Objekt in der Ebene des Strahlungsempfängers ab. Die Okularlinse dient zur Ausrichtung des Meßkopfes auf das Objekt und zur Kontrolle der vollständigen Ausleuchtung des Empfängers.

Je nach der Art des Strahlungsempfängers unterscheidet man thermoelektrische und fotoelektrische Gesamtstrahlungs-pyrometer.

Thermoelektrische Gesamtstrahlungs-pyrometer. Beim thermoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometer besteht der Strahlungsempfänger aus einem an der Meßstelle geschwärzten Thermoelement. Durch die einfallende Strahlung wird eine Thermospannung erzeugt, die ein Maß für die Objekttemperatur darstellt. Bild 65/1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Gesamtstrahlungs-pyrometers. ① ②

Die Umgebungstemperatur soll 20 °C betragen. Kann sie nicht eingehalten werden, wendet man eine Kompensationsschaltung ähnlich der Kompensationsdose an, die im Pyrometer untergebracht wird.

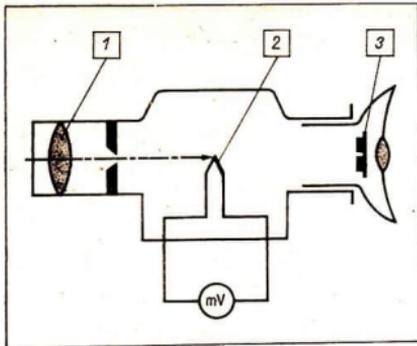
Der Einsatzbereich eines thermoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometers liegt zwischen der Raumtemperatur und +2000 °C. Die Meßfehler betragen zwischen 1% und 2%.

Fotoelektrisches Gesamtstrahlungs-pyrometer. Im Unterschied zum thermoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometer besteht beim fotoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometer der Strahlungsempfänger aus einem optoelektronischen Bauelement (Fotozelle, Fotowiderstand, Fotodiode, Fototransistor oder Fotoelement). Der Aufbau dieses Pyrometers geht aus Bild 65/2 hervor. Als lichtempfindliches Bauelement findet hier ein Silizium-Fotoelement Anwendung. Dieses Fotoelement erzeugt bei Lichteinfall aufgrund des inneren lichtelektrischen Effektes und des Sperrschichtfotoeffektes (↗ Fest-Ph, S. 154) eine kleine Spannung. Es wird z. B. in Belichtungsmessern in der Fotografie eingesetzt. ①

Der Vorteil der fotoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometer besteht in der einfachen Konstruktion und der unkomplizierten Anwendung.

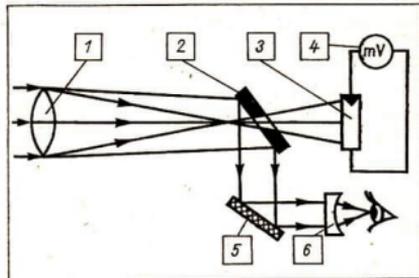
Der Grundfehler beträgt ± 20 °C, was bei einem Meßbereich bis 2000 °C 1% entspricht. Infolge der geringen Helligkeit strahlender Körper unter 800 °C beginnt der Meßbereich erst bei diesem Temperaturbereich.

Anwendung der Gesamtstrahlungs-pyrometer. Gesamtstrahlungs-pyrometer werden für Dauermessungen an Anlaß-, Glüh- und Härteöfen, in der Glasindustrie, der keramischen Industrie, in Müllverbrennungsanlagen, Eisenhüttenbetrieben, an Roheisen-



65/1
Aufbau eines thermoelektrischen
Gesamtstrahlungs-pyrometers

- 1 — Objektiv (Quarzlinse)
- 2 — Thermoelement
- 3 — Blende mit Graufilter als Augenschutz



65/2
Aufbau eines fotoelektrischen
Gesamtstrahlungs-pyrometers

- 1 — Objektivlinse
- 2 — geneigte Blende mit zentraler Bohrung
- 3 — Fotoelement
- 4 — in °C geeichtes Anzeigedrehspulgerät (Millivoltmeter)
- 5 — Spiegel
- 6 — Okular

mischern, Stoßöfen, Winderhitzern und zur Temperaturmessung an Gewölben von Siemens-Martin-Öfen eingesetzt.

Teilstrahlungs-pyrometer

Bei der Temperaturmessung an glühenden Blöcken, Blechen und Drähten werden Pyrometer eingesetzt, die nur einen Teil der ausgesandten Strahlung, z. B. eine bestimmte Farbe, als Maß für die Temperatur ausnutzen. Wie kann man mit diesen Teilstrahlungs-pyrometern die Temperatur messen ?

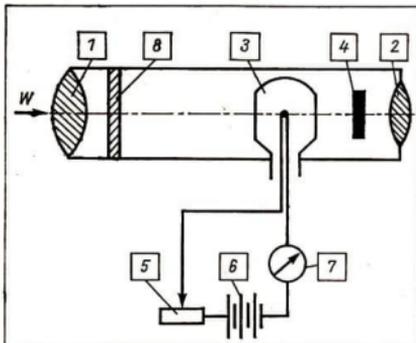
Glühfaden-Teilstrahlungs-pyrometer. Das Glühfaden-Teilstrahlungs-pyrometer (Bild 66/1) beruht auf dem Vergleich der Leuchtdichte (Helligkeit) des Objekts mit der Leuchtdichte eines Vergleichsstrahlers (Spezialglühlampe) für einen engen Farbbereich. Meistens wird der Helligkeitsvergleich im roten Farbbereich durchgeführt.

Die Helligkeit eines Glühfadens ist durch den Lampenstrom veränderbar. Dieser wird so eingestellt, daß sich der Glühfaden im Gesichtsfeld nicht mehr vom Bild des strahlenden Objekts abhebt (Bild 66/2). Der Glühfadenstrom ist damit ein Maß für die Temperatur des Objekts.

Die Temperatur wird durch ein im Meßkopf eingebautes Strommeßgerät angezeigt, das in Einheiten der Temperatur geeicht ist (vgl. Umschlagbild).

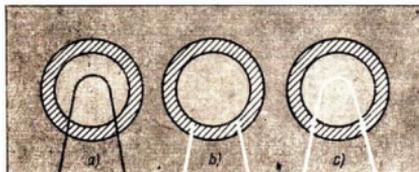
-
- ① Weshalb wird die Meßstelle des Thermoelements beim Pyrometer geschwärzt ?
 - ② Erklären Sie anhand Bild 65/1 die Wirkungsweise eines thermoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometers!
 - ③ Beschreiben Sie anhand Bild 65/2 die Wirkungsweise eines fotoelektrischen Gesamtstrahlungs-pyrometers!

Glühfaden-Teilstrahlungs-pyrometer gestatten Temperaturmessungen zwischen 700 °C und 2000 °C. Ab 1400 °C ist eine Strahlungsschwächung durch ein Graufilter (Rauchglas) notwendig, um den Glühfaden zu schonen. Der Meßfehler beträgt für geübte Beobachter ± 5 °C bei 1500 °C.



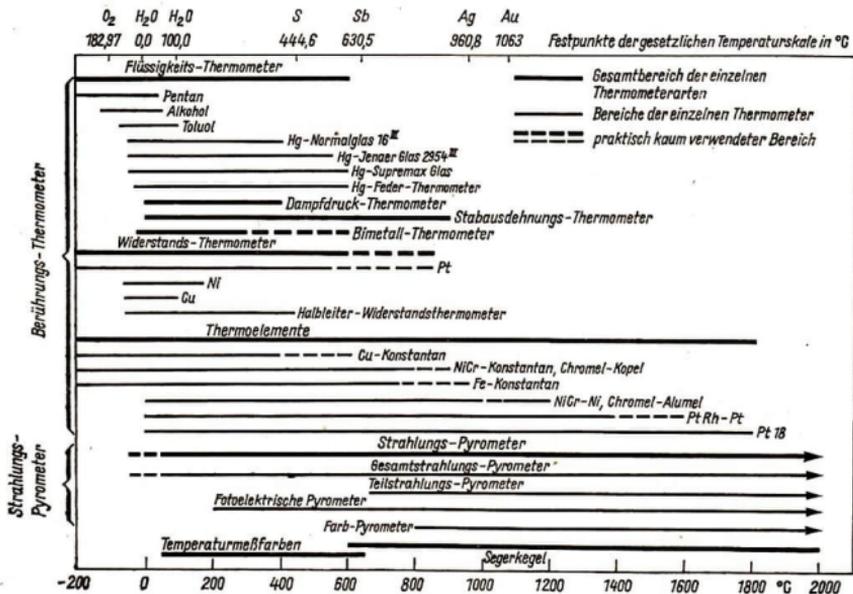
66/1 Aufbau eines Glühfadenpyrometers

- 1 — Objektiv
- 2 — Okular
- 3 — Spezialglühlampe
- 4 — Rotfilter
- 5 — veränderlicher Widerstand
- 6 — Spannungsquelle
- 7 — Strommeßgerät (in °C geeicht)
- 8 — Filter



66/2 Vergleich der Helligkeit des strahlenden Objekts mit der Helligkeit des Glühfadens

66/3 Übersicht über die Thermometerarten und deren Meßbereiche



Es heißt, die Produktion ist die Grundlage des Lebens der Gesellschaft. Eine Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein natürlicher Ausgangsstoffe zur Herstellung von Arbeitsmitteln. Die in der Natur vorkommenden Ausgangsstoffe wie Holz, Erze, Gesteine und Erden usw. eignen sich jedoch nicht ohne weiteres zur Verarbeitung und Verwendung, weil z. B. ihre mechanischen Eigenschaften wie Dichte, Festigkeit und Härte nicht immer den Anforderungen genügen.

Es ist zumeist notwendig, die mechanischen Eigenschaften der Stoffe zunächst so zu verändern, daß sie als Werkstoffe in der gesellschaftlichen Produktion verwendet werden können.

Die Anforderungen der Produktion, der Militärtechnik, des wissenschaftlichen Gerätebaus u. a. an die Eigenschaften von Werkstoffen haben in den letzten Jahrzehnten eine schnelle und erfolgreiche Entwicklung der Festkörperphysik bewirkt. Es ist gelungen, die Eigenschaften bekannter Werkstoffe zum Teil wesentlich zu verbessern, sie spezifischen Anforderungen anzupassen und neue Werkstoffe zu entwickeln.

Die Werkstoffwissenschaft hat außerdem die Aufgabe zu lösen, den Einsatz von Werkstoffen unter materialökonomischen Bedingungen zu ermöglichen, wie sie bisher noch nicht bestanden haben. Dazu gehören zum Beispiel die Wiederverwendbarkeit der eingesetzten Werkstoffe und energiearme Aufbereitungsverfahren, die Kombination verschiedener Werkstoffeigenschaften in nur einem Werkstoff und die Schaffung spezieller Werkstoffe für ganz bestimmte Einsatzzwecke.

Unter den gegenwärtigen Bedingungen des Wirtschaftskampfes der kapitalistischen Staaten und Konzernunternehmen gegen die sozialistischen Staaten kommt dem Wirtschaftswachstum in der DDR größte Bedeutung zu. Das wird in den Parteitage-dokumenten der SED und den Plänen für die Entwicklung der Volkswirtschaft zum Ausdruck gebracht. Darin wird z. B. die schöpferische Arbeit der Wissenschaftler, Ingenieure und Neuerer auf solche Lösungen orientiert, „mit denen aus jeder Einheit eingesetzter Rohstoffe und Energieträger ein Maximum an Gebrauchswert erzielt und ein hoher Anstieg der Produktivität ermöglicht wird“.

Im Fünfjahrplan 1981 bis 1985 steht z. B.: „Zur Senkung des spezifischen Materialverbrauchs sind effektive und kostengünstige Technologien sowie **massesparende Konstruktionen** zu entwickeln und einzuführen.“ Damit sind bis 1985 Materialeinsparungen von mehreren Millionen Tonnen Walzstahl, vielen zehntausend Tonnen Aluminium und Kupfer und spürbare Einsparungen bei Legierungselementen und Plastwerkstoffen zu erzielen.

Im folgenden wird deshalb auch an verschiedenen Beispielen gezeigt, wie man unter bewußter Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse Werkstoffe unter voller Ausnutzung ihrer Stoffeigenschaften kostengünstig und massesparend einsetzen kann. Bei solchen Beispielen handelt es sich allerdings nicht etwa um neuartige, noch nicht bekannte Lösungen, sondern es werden einige prinzipielle Hinweise gegeben, wie in

der Werkstoffwissenschaft und bei der Konstruktion ständig nach der günstigsten Lösung der jeweils gestellten Aufgabe gesucht werden kann, um solche Ziele zu erreichen wie z. B. die Senkung des Werkstoffverbrauchs um jährlich 5 Prozent.

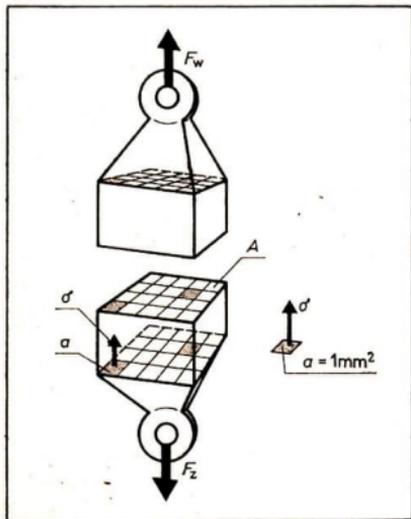
1. Elastizität und Plastizität

In der Mechanik werden die Gesetzmäßigkeiten der Kinematik und der Dynamik z. B. mit Hilfe des Modells starrer Körper untersucht. Die Teilchen eines solchen Körpers bilden dabei ein System starr miteinander verbundener Massepunkte, deren Abstand zueinander sich nicht verändert. Solch einen idealen Festkörper gibt es aber in der Realität nicht. Alle realen Festkörper erleiden unter der Einwirkung äußerer Kräfte eine Formänderung, die nach dem Fortfall der äußeren Kraftwirkung ganz oder zum Teil wieder verschwindet. Man bezeichnet solche realen Körper als elastisch. ①

Die Elastizität der realen Körper hat ihre Ursache in der zwischen den Stoffteilchen des Körpers bestehenden Zusammenziehungskraft. Diese Zusammenziehungskraft ist sehr stark abhängig von der stofflichen Zusammensetzung des Körpers, vom inneren Aufbau der Stoffe. ②

Eine besondere physikalische Eigenschaft verschiedener Stoffe wie z. B. Blei, feuchter Ton, Plaste und Glas ist die Plastizität. Dadurch ist es möglich, bei solchen plastischen Stoffen durch äußere Kräfte eine bleibende Formänderung herbeizuführen, ohne daß der Zusammenhang zwischen den Stoffteilchen verlorengeht. Plastizität tritt aber auch bei elastischen Stoffen auf, wenn die Normalbedingungen verändert werden wie z. B. die mechanische Belastung (vgl. S. 97) oder die Temperatur (vgl. S. 94); dann kann u. U. auch Stahl plastisch sein..

Mechanische Belastung von Festkörpern



Die Spannung. Wird ein fest eingespannter Körper (Bild 68/1) durch eine Zugkraft F_z belastet, dann tritt an der Einspannstelle eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete Kraft F_w auf. Der Körper überträgt also die Kraft \vec{F}_z auf die Einspannstelle ($\vec{F}_z = \vec{F}_w$).

Es wird vorausgesetzt, daß die Kraft F_z gleichmäßig durch die gesamte Querschnittsfläche A des Körpers übertragen wird. In jeder der gleichgroßen Teilquerschnittsflächen a wirkt dann eine gleichgroße Kraft.

Diese auf die Flächeneinheit bezogene Kraft bezeichnet man als

68/1 Eingespannter Körper unter Belastung durch eine Zugkraft

mechanische Spannung σ .

Die mechanische Spannung σ ist gleich dem Quotienten aus der Kraft F und der belasteten Querschnittsfläche A .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Einheit der mechanischen Spannung ist 1 N/mm^2 . $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$

Die mechanische Spannung, die durch äußere Kräfte erzeugt wird, darf einen vom Werkstoff abhängigen zulässigen Wert nicht überschreiten, wenn der Körper nicht zerstört werden soll.

Wenn also bekannt ist, wie groß die Zugspannung σ_z im Seil eines Personenaufzuges sein darf, dann kann man bei einer vorgegebenen Belastung F den für das Seil erforderlichen Querschnitt errechnen, oder es kann eine der anderen Größen berechnet werden.

- Das Seil eines Personenaufzuges besteht aus 114 Drähten von je $0,282 \text{ mm}^2$ Querschnitt. Der Aufzug ist zugelassen für eine Gesamtbelastung von 5000 N. Wie groß ist bei dieser Belastung die mechanische Zugspannung σ_z im Aufzugsseil?

Gegeben:

$$A_D = 0,282 \text{ mm}^2$$

$$Z_D = 114$$

$$F = 5000 \text{ N}$$

Lösung:

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

$$\sigma_z = \frac{5000 \text{ N}}{32,2 \text{ mm}^2}$$

$$\underline{\underline{\sigma_z \approx 155 \text{ N/mm}^2}}$$

$$A = Z_D \cdot A_D$$

$$A = 114 \cdot 0,282 \text{ mm}^2$$

$$\underline{\underline{A \approx 32,2 \text{ mm}^2}}$$

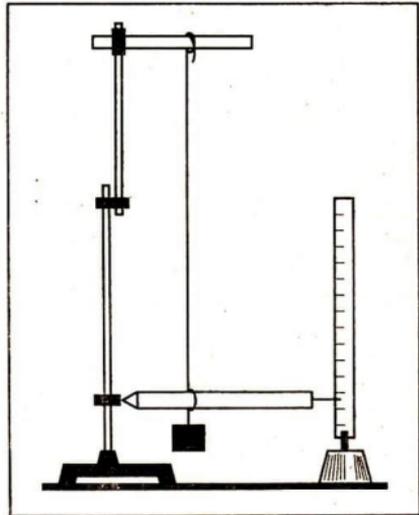
Gesucht:

σ_z

Die Dehnung. Infolge der mechanischen Spannung wird der Querschnitt eines Körpers belastet. Dabei entsteht eine Verformung, die sich bei Zugbelastung als eine Verlängerung des Körpers feststellen läßt. ③

- 1
▼ Es ist festzustellen, welcher Zusammenhang zwischen der Verlängerung eines Kupferdrahtes und seiner Anfangslänge bei einer Zugbelastung besteht (Bild 69/1)! Benutzen Sie dazu die Anleitung nach PSV 1/2, V 3.2.4.!

69/1 Versuchsaufbau und Anzeigevorrichtung zum Nachweis der Dehnung



- Zeichnen Sie das Bild des Modells „starrer Körper“ für einen Würfel!
- Lesen Sie in PhÜb über die Kohäsionskraft!
- Wie wird sich eine Druckbelastung auf die Abmessungen eines würfelförmigen Körpers auswirken?

Im Ergebnis des Experiments findet man, daß die Verlängerung Δl des Drahtes direkt proportional der Anfangslänge l_0 des Drahtes ist.

$$\Delta l \sim l_0$$

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l_0$$

Der Proportionalitätsfaktor ist demzufolge in dem betrachteten Belastungsbereich eine Konstante.

Man bezeichnet diese Konstante als die

Dehnung ε .

Die Dehnung ε ist gleich dem Quotienten aus der Verlängerung Δl eines Körpers und der Anfangslänge l_0 .	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	(2)
--	--------------------------------------	-----

Einheit der Dehnung ist 1 mm/mm
(die Dehnung wird meist dimensionslos angegeben).

In der Praxis verwendet man zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften für die Dehnung ε einen in Prozenten ausgedrückten Wert und kennzeichnet ihn zum Unterschied von ε als

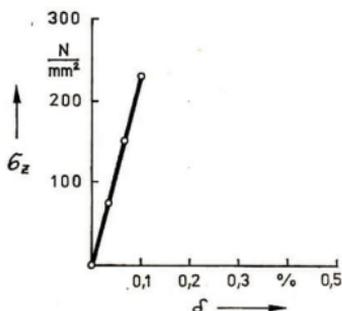
$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Ändert man in dem Experiment zur Dehnung die belastende Kraft F , das heißt, ändert sich die Spannung σ des Drahtes, dann ändert sich auch die Dehnung ε .

Man findet (bei $A = \text{konstant}$):

F	$2F$	$3F$
σ	2σ	3σ
ε	2ε	3ε

Die Dehnung ε ist der Spannung σ direkt proportional.



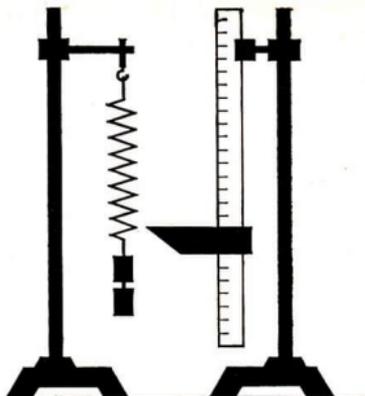
Trägt man die Meßergebnisse aus solch einem Experiment in einem Diagramm (Bild 70/1) auf, dann erkennt man aus dem gleichmäßigen Anstieg der Kurve ebenfalls die Gesetzmäßigkeit $\varepsilon \sim \sigma$.

70/1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Proportionalitätsbereich

71/1 Dehnungsmessung an einer zylindrischen Schraubenfeder

Der Elastizitätsmodul. Führt man nach Bild 71/1 an einer Zylinderfeder Messungen zur Dehnung ε in Abhängigkeit von der Spannung σ durch (vgl. PSV 1/2, V 3.2.1.), dann stellt man ein gleichbleibendes Verhältnis von Dehnung und Spannung für diese Feder fest. Wählt man einen Gummifaden oder eine Feder aus einem anderen Material, dann erhält man ein jeweils anderes, gleichbleibendes Verhältnis. Man bezeichnet dieses Verhältnis als

Dehnzahl α .



<p>Die Dehnzahl α ist das Verhältnis von Dehnung ε und Spannung σ. Sie ist vom Werkstoff des Festkörpers abhängig.</p>	$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (4)$
---	---

Einheit der Dehnzahl ist $1 \text{ mm}^2/\text{N}$.

Diese Gesetzmäßigkeit wurde erstmals von Robert Hooke (1635 bis 1703) als Elastizitätsgesetz (Hookesches Gesetz) beschrieben. Dieses Gesetz gilt jedoch (vgl. S. 73) nur in einem begrenztem Bereich. ^①

Die Dehnzahl ist für jeden Werkstoff in einem begrenzten Belastungsbereich konstant; das wurde bereits mit den Beispielen Feder aus Stahl und Faden aus Gummi angedeutet.

Für die Dehnzahl α ergeben sich sehr kleine Werte.

$$\alpha_{\text{Stahl}} = 0,000\,047\,6 \text{ mm}^2/\text{N}$$

Man verwendet im allgemeinen den Kehrwert der Dehnzahl.

$$E = \frac{1}{\alpha}$$

Den Kehrwert der Dehnzahl α bezeichnet man als **Elastizitätsmodul E** .

Der Elastizitätsmodul ist eine für die Festigkeitsberechnung von Bauteilen wichtige Kenngröße.

<p>Der Elastizitätsmodul E ist gleich dem Quotienten aus Spannung σ und Dehnung ε. Er ist eine Stoffkonstante.</p>	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$
--	--

Einheit des Elastizitätsmoduls ist $1 \text{ N}/\text{mm}^2$.

① Nennen Sie ein Gesetz, bei dem Sie Gültigkeitsgrenzen als einschränkende Bedingung angeben können!

Der Elastizitätsmodul ist im wesentlichen vom Werkstoff des Körpers, aber bei vielen Stoffen auch noch von der Temperatur, von der Wärmebehandlung (gehärtet, gegläht) und vom Verformungszustand (gegossen, gewalzt, gezogen) abhängig. ①

Werkstoff	E in N/mm^2
Stahl	210000
Federstahl	220000
Grauguß	75000
Kupferdraht	130000
Aluminiumdraht	70000
Blei	17000
Holz	10000
Glas	60000

Ein Prüfstab (vgl. S. 111) von 200 mm Meßlänge und einem Querschnitt von 314 mm^2 zeigte bei einer Zugbelastung von 65940 N eine Verlängerung von 0,2 mm. Wie groß waren die Spannung, Dehnung und der Elastizitätsmodul?

Gegeben:

$$l_0 = 200 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 0,2 \text{ mm}$$

$$A = 314 \text{ mm}^2$$

$$F_z = 65940 \text{ N}$$

Lösung:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\sigma_z = \frac{65940 \text{ N}}{314 \text{ mm}^2} \quad \varepsilon = \frac{0,2 \text{ mm}}{200 \text{ mm}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_z = 210 \text{ N/mm}^2}} \quad \underline{\underline{\varepsilon = 0,001}}$$

Gesucht:

$$\sigma_z$$

$$\varepsilon$$

$$E$$

$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon}$$

$$E = \frac{210 \text{ N/mm}^2}{0,001}$$

$$\underline{\underline{E = 210000 \text{ N/mm}^2}}$$

Das Aluminiumseil einer elektrischen Freileitung hat einen Querschnitt von 60 mm^2 . Das Seil wird auf einer Länge von 180 m mit einer Zugkraft von 5000 N gespannt. Der Elastizitätsmodul für dieses Aluminiumseil ist 60000 N/mm^2 . Wie groß ist die Verlängerung des Seiles beim Ausspannen?

Gegeben:

$$F_z = 5000 \text{ N}$$

$$A = 60 \text{ mm}^2$$

$$l_0 = 180 \text{ m}$$

$$E = 60000 \text{ N/mm}^2$$

Lösung:

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l_0 \quad \varepsilon = \frac{\sigma_z}{E}$$

$$\Delta l = \frac{F_z \cdot l_0}{A \cdot E} \quad \sigma_z = \frac{F_z}{A}$$

$$\Delta l = \frac{5000 \text{ N} \cdot 180000 \text{ mm}}{60 \text{ mm}^2 \cdot 60000 \text{ N/mm}^2}$$

$$\underline{\underline{\Delta l = 250 \text{ mm}}}$$

Gesucht:

$$\Delta l$$

Belastungsgrenzen

Im Abschnitt Mechanische Belastung von Festkörpern war erläutert worden: Setzt man einen Körper einer Zugbelastung aus, dann kann man in Abhängigkeit von der Zugspannung σ , eine Längenänderung des Körpers feststellen. Der Körper wird gedehnt.

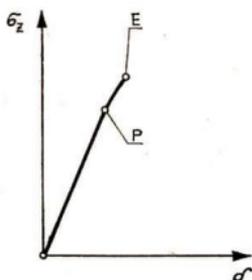
Die Elastizitätsgrenze. Die Dehnung des Körpers ist bei zunehmender Belastung zunächst elastisch, sie verschwindet nach der Entlastung. Der Körper hat danach wieder seine ursprüngliche Länge.

Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm liegen die Meßwertpunkte auf einer Geraden (Bild 73/1), das heißt, die Dehnung ist der Spannung proportional. Der Punkt P heißt Proportionalitätsgrenze. Steigert man die Spannung über den für den Punkt P angegebenen Betrag, dann ist die Dehnung nur noch bedingt elastisch; der Körper erleidet bereits in diesem Bereich eine geringfügige bleibende Dehnung. Der Betrag der bleibenden Dehnung ist infolge der Festlegungen jedoch sehr gering (0,01%), und für alle praktischen Berechnungen wird der Werkstoff bis zu diesem Punkt E als voll elastisch angenommen. Dieser Punkt E heißt Elastizitätsgrenze. Bis zu diesem Punkt E gilt das Hookesche Gesetz.

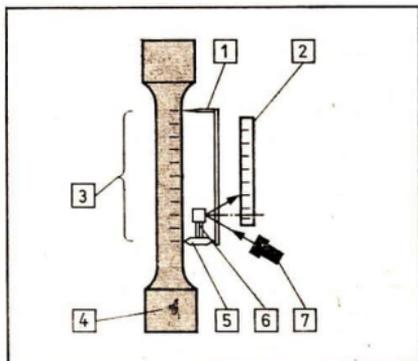
Messen der Spannung und der Dehnung.

Um die Spannung im Querschnitt eines unter Zugbelastung stehenden Körpers zu bestimmen, muß man mit einem geeigneten Kraftmesser die wirkende Zugkraft messen und mit Hilfe des belasteten Querschnittes die Spannung errechnen. (vgl. S. 98). Die Dehnung kann aus Längenmessungen vor und während der Belastung gefunden werden.

Diese Dehnung unter Belastung beträgt im betrachteten Belastungsbereich etwa 0,15%. Da die bleibende Verlängerung eines Prüfstabes im Elastizitätsbereich, die ebenfalls gemessen werden muß, aber unter 0,01% der Anfangslänge des Stabes von meist 100 mm oder 200 mm Länge liegt, muß das Meßgerät mindestens eine Ablesegenauigkeit von 0,0001 mm



73/1
Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Elastizitätsbereich



73/2
Spiegelmeßgerät zur Dehnungsmessung

- 1 — Meßpunkt (fest)
- 2 — Meßskala für Lichtzeiger
- 3 — Meßstrecke des Probestabes
- 4 — Einspannkopf des Probestabes
- 5 — Meßpunkt (beweglich)
- 6 — Kippspiegel für die Ablenkung des Lichtes
- 7 — Lichtquelle

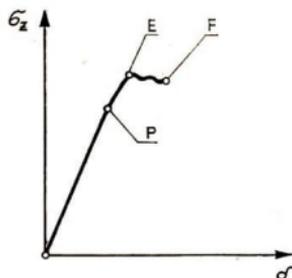
① Wie wird sich der Elastizitätsmodul für Stahl verändern, wenn die Temperatur dieses Werkstoffes durch Erwärmung um mehrere hundert Kelvin zunimmt?

haben. Diese Genauigkeit erreicht man mit einem Spiegelmeßgerät (Bild 73/2). Am Prüfstab (4) wird der Meßbügel für die Meßlänge l_0 im Punkt (1) fest aufgesetzt und im Punkt (5) mit dem Fuß des Kippspiegels (6) beweglich angebracht. Bei einer Verlängerung der Meßlänge wird der Spiegel gekippt, und die Lichtmarke auf der Skale (2) wandert aus der Nullstellung heraus. Dieses genaue Meßverfahren ist sehr aufwendig, deshalb wird es meist nur für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt.

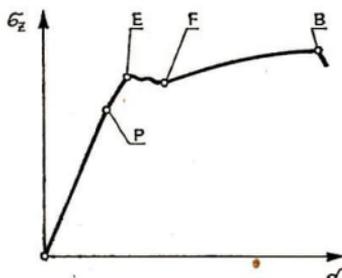
Bedeutung der Elastizitätsgrenze. Jedes Werkstück, jedes Maschinenteil oder Bauwerk wird bei der Fertigung, beim Transport und beim Einsatz mechanisch belastet. Aus Gründen der Paßgenauigkeit, der Funktionsfähigkeit und der Sicherheit strebt man an, daß sich ein unter Belastung dehndes Werkstück nach dem Fortfall der Belastung wieder elastisch zurückformt. Des weiteren muß gefordert werden, daß jedes Werkstück der vorgesehenen Belastung standhält.

Aus diesen Gründen dürfen Festkörperwerkstoffe nicht über die Elastizitätsgrenze hinaus belastet werden.

Für die Erfüllung dieser Bedingungen ist der Konstruktionsingenieur verantwortlich, der durch Berechnungen festlegt, welcher Werkstoff und welche Abmessungen für ein Maschinenteil bei vorgegebener Belastung auszuwählen sind. Der Fertigungsingenieur hat zu prüfen und darauf zu achten, daß das Maschinenteil durch die Einwirkung von Werkzeugen und Wärme während der Fertigung nicht überlastet wird. Der Ingenieur im Prüflabor ermittelt die Werkstoff-Kenngrößen und ermöglicht dadurch die verantwortungsvolle Arbeit in den Konstruktions- und Fertigungsabteilungen.



74/1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Fließgrenze



74/2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Bruchgrenze

Fließgrenze. Setzt man im Experiment (S. 71) zur Dehnung eines Körpers die Erhöhung der Zugbelastung fort, dann ergeben die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eingetragenen Meßpunkte einen veränderten Kurvenverlauf (Bild 74/1).

Auf Prüfmaschinen (vgl. S. 111) kann man feststellen, daß an einem belasteten Prüfstab bei Belastungszunahme über den Punkt E hinaus die Dehnung allmählich schneller zunimmt als die hierfür erforderliche Spannung. Die Diagrammkurve erfährt eine Krümmung bis zum Punkt F (Bild 74/1). Von da ab verlängert sich der Prüfstab ohne weitere wesentliche Belastungszunahme sehr stark. Der Werkstoff des Prüfstabes hat also offensichtlich eine obere Belastungsfähigkeit, bei der sich der Prüfstab zu strecken und der Werkstoff zu fließen beginnt.

Der Punkt F im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Bild 74/2) wird als **Fließgrenze** bezeichnet. Der Werkstoff verhält sich unter dieser Belastung verformbar; er ist **plastisch**. Die Kurve verläuft dabei von F bis B nahezu waagrecht, um danach abzufallen. Die bis zum Punkt B der Spannungs-Dehnungs-Kurve erreichbare Spannung

ist die maximal erreichbare Spannung σ_B . Bei dieser Spannung geht der Prüfkörper zu Bruch. Diese hohe Spannung darf allerdings keinem Werkstück zugemutet werden. Vorschriften legen fest, daß in allen Bereichen der Verwendung von Werkstoffen die Belastung nur zu einem bestimmten Teil der höchstmöglichen Spannung σ_B zugelassen ist. ①

Werkstoff	Spannung σ_B in N/mm ²
Stahl — St 50	500
Stahl — St 70	700
Federstahl	1500
Grauguß — GG 14	140
Kupfer (weich)	210
Aluminium (hart)	150

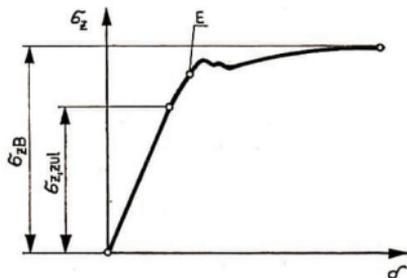
Zulässige mechanische Spannung. Einem Bauteil darf nur eine Beanspruchung je Querschnittseinheit, d. h. eine Spannung zugemutet werden, die garantiert, daß unter der äußeren Belastung (z. B. Zugkraft) keine unzulässige Verformung bzw. ein Bruch eintritt. Die für Werkstoffe zulässige Zugspannung $\sigma_{z, zul}$ (Bild 75/1) ist festgelegt. Sie ist in Abhängigkeit von

- Belastungsart (↗ S. 100) und
- Werkstoff

aus Tabellen zu entnehmen. Sie garantiert eine Sicherheit gegenüber Zerstörung.

Zulässige mechanische Spannung bei ruhender Zugbelastung

Werkstoff	Spannung $\sigma_{z, zul}$ in N/mm ²
Stahl — St 50	155
Stahl — St 70	210
Federstahl	650
Grauguß	40
Kupfer	100
Aluminium	40



75/1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Bruchspannung und zulässige Spannung

Für Entwurfsberechnungen gilt

$$\sigma_{z, zul} = \frac{F_z}{A} \quad (6)$$

① Verschaffen Sie sich anhand der beiden Tabellen für σ_B und $\sigma_{z, zul}$ einen Überblick, zu wieviel Prozent etwa die Werkstofffestigkeit ausgenutzt wird!

Aus dieser Gleichung wird der erforderliche Querschnitt für das Bauteil berechnet, der die Bedingung erfüllt.

$$A_{\text{erf}} = \frac{F_z}{\sigma_{z, \text{zul}}} \quad (7)$$

- Das Drahtseil eines Kranes wird maximal mit einer Gewichtskraft von 120000 N belastet. Wie viele Drähte von 1,7 mm Durchmesser muß das Seil besitzen, wenn die zulässige Spannung $\sigma_{z, \text{zul}} = 250 \text{ N/mm}^2$ vorgegeben ist?
Bemerkung: In Tabellen läßt sich aus dieser Angabe der Durchmesser des Seiles ablesen.

Gegeben:

$$F = 120000 \text{ N}$$

$$d = 1,7 \text{ mm}$$

$$\sigma_{z, \text{zul}} = 250 \text{ N/mm}^2$$

Gesucht:

$$A_{\text{Seil}}$$

$$A_{\text{Draht}}$$

$$Z$$

Lösung:

$$A_{\text{Seil}} = \frac{F_z}{\sigma_{z, \text{zul}}}$$

$$A_{\text{Seil}} = \frac{120000 \text{ N}}{250 \text{ N/mm}^2}$$

$$A_{\text{Seil}} = 480 \text{ mm}^2$$

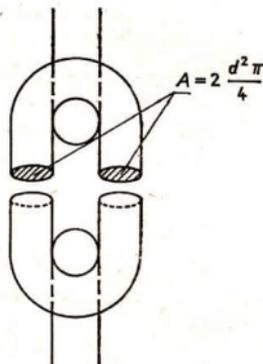
$$Z = \frac{A_{\text{Seil}}}{A_{\text{Draht}}}$$

$$Z = \frac{480 \text{ mm}^2}{2,27 \text{ mm}^2}$$

$$Z = 211 \text{ Drähte}$$

$$A_{\text{Draht}} = r^2 \cdot \pi$$

$$A_{\text{Draht}} = 2,27 \text{ mm}^2$$



Es wird gewählt nach Tabelle ein Stahlseil mit 222 Einzeldrähten und einem Durchmesser von 37 mm.

76/1

Kettenglied einer Hebezugkette A: zugbelasteter Querschnitt

- Die Gliederkette eines Hebezeuges (Bild 76/1) soll maximal einer Belastung von 30000 N standhalten. Welchen Durchmesser muß man für den Kettenrundstahl wählen, wenn als zulässige Zugspannung 60 N/mm^2 vorgeschrieben ist?

Gegeben:

$$F = 30000 \text{ N}$$

$$\sigma_{z, \text{zul}} = 60 \text{ N/mm}^2$$

Lösung:

$$A = \frac{F_z}{\sigma_{z, \text{zul}}}$$

$$A = \frac{30000 \text{ N}}{60 \text{ N/mm}^2}$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{2\pi}}$$

$$A = 2 \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

$$d = 17,84 \text{ mm}$$

gewählt $\underline{\underline{d = 18 \text{ mm}}}$

Gesucht:

$$A$$

$$d$$

Elastische Dehnung und Biegung

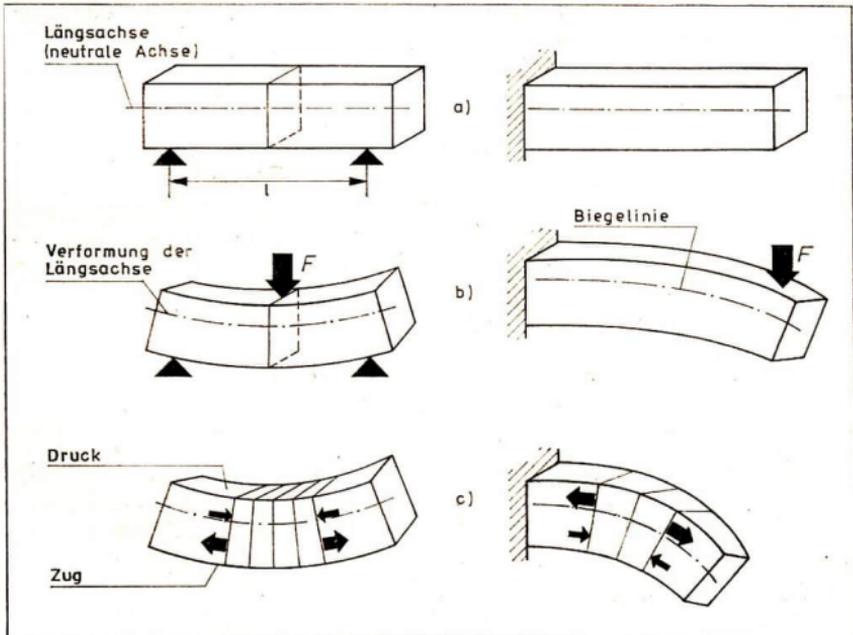
Bisher war angenommen worden, daß ein Körper nur in seiner Längsrichtung belastet wird. Die dabei im Körper auftretende Spannung war als Zugspannung σ_z bezeichnet worden. In vielen Fällen werden Körper quer zu ihrer Längsrichtung belastet, dabei werden sie gebogen.

Die Biegung. Bei der Belastung eines Körpers (Träger auf 2 Stützen) auf Biegung (Bild 77/1) wird derselbe gekrümmt. Dabei werden in diesem Falle die oberhalb der neutralen Linie (Biegelinie) liegenden Teile des Körpers verkürzt, zusammengedrückt, die unterhalb der Biegelinie liegenden Teile verlängert, auseinandergezogen. ①

Im oberen Teil tritt Druckspannung (\nearrow S. 100) auf, im unteren Teil Zugspannung. Beim einseitig eingespannten Träger wirken die Spannungen umgekehrt.

Im Normalfall sind die bei Biegung eines Körpers auftretenden Druckspannungen und die auftretenden Zugspannungen gleich groß.

Die so erzeugte Spannung wird als Biegespannung σ_b bezeichnet. Die zulässigen Biegespannungen für einen bestimmten Werkstoff werden aus Tabellen entnommen.

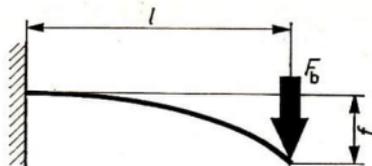


- 77/1 a) Träger auf zwei Stützen und einseitig eingespannter Träger
b) Träger auf Biegung beansprucht
c) Spannungsverteilung im belasteten Querschnitt des Trägers

① Lesen Sie in TeilÜb über Biegen nach!

Zulässige mechanische Spannung bei ruhender Biegebelastung.

Werkstoff	Spannung $\sigma_{b, zul}$ in N/mm ²
Stahl – St 50	180
Federstahl	750
Grauguß	50
Holz	13



78/1
Durchbiegung eines einseitig eingespannten Trägers

Die Durchbiegung. Aus Überlegungen zum Auftreten von Zug- und Druckspannungen bei der Biegung von Körpern kann man schließen, daß sich ein Körper bei Biegebelastung ähnlich elastisch verhalten müßte wie bei Zugbelastung.

Es ist festzustellen, welcher Zusammenhang zwischen der Durchbiegung eines Körpers und der Belastung besteht!

Benutzen Sie dazu die Anleitung nach PSV 1/2, V 3.2.8. (Bild 78/1)!

Im Ergebnis des Experiments findet man, daß die **Durchbiegung f** direkt proportional der Biegekraft F_b ist.

$$f \sim F_b$$

Verändert man im dargestellten Experiment die Einspannlänge l des Körpers, dann erhält man ebenfalls eine Proportionalität.

$$f \sim l$$

Damit erweist sich, daß die Durchbiegung f eines Körpers vom Produkt aus F_b und l abhängt.

$$f \sim F_b \cdot l$$

Man bezeichnet dieses Kraftmoment als

Biegemoment M_b	$M_b = F_b \cdot l$	(8)
-------------------	---------------------	-----

Einheit des Biegemoments ist 1 N · mm.

Bei diesen Experimenten wird vorausgesetzt, daß die Elastizitätsgrenze des Festkörperwerkstoffes nicht überschritten wird. Verwendet man in Fortsetzung des Biegeexperimentes Körper aus verschiedenen Werkstoffen, dann kann man feststellen, daß die Durchbiegung f umgekehrt proportional der zulässigen Biegespannung $\sigma_{b, zul}$ ist.

$$f \sim \frac{1}{\sigma_{b, zul}}$$

Damit erhält man einen Quotienten, der den Widerstand des Festkörpers gegen Biegung beschreibt.

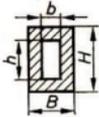
Benutzt man in einem weiteren Experiment anstelle der Fahrradspeiche andere Festkörper, die eine andere Querschnittsform besitzen, dann stellt man fest:

Die Durchbiegung f hängt auch von der Querschnittsform und den Abmessungen der

Querschnittsfläche des Körpers ab. Querschnittsform und Querschnittsfläche als weitere Einflußgrößen werden durch das Widerstandsmoment W erfaßt. Es besteht die Proportionalität

$$f \sim \frac{1}{W}.$$

Das Widerstandsmoment gegen Biegung ist eine physikalisch-technische Größe, das in Tabellen aufgeschrieben ist. Typische Querschnittsformen, die ein besonders großes Widerstandsmoment besitzen, zeigt folgende Tabelle.

Querschnittsformen	Widerstandsmoment	Querschnittsformen	Widerstandsmoment
	$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$		$W = \frac{d^3}{10}$
	$W = \frac{h^3}{6}$		$W = \frac{D^4 - d^4}{10D}$
	$W = \frac{2h^3}{17}$		$W = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6H}$

Aus den Proportionalitäten

$$f \sim \frac{M_b}{\sigma_b} \quad \text{und}$$

$$f \sim \frac{1}{W}$$

kann man den Zusammenhang zwischen Biegemoment, Biegespannung und Widerstandsmoment erkennen.

Für das Widerstandsmoment W bildet man die Gleichung

$$W = \frac{M_b}{\sigma_{b,zul}} \quad (9)$$

Einheit des Widerstandsmoments ist 1 mm^3 .

Aus der obigen Gleichung gewinnt man die fundamentale Biegegleichung zum Errechnen des Biegemoments

Biegemoment	$M_b = W \cdot \sigma_{b,zul}$	(10)
--------------------	--------------------------------	------

Einheit des Biegemoments ist $1 \text{ N} \cdot \text{mm}$.

- Es ist festzustellen, mit welcher Kraft ein Nagel als einseitig eingespannter runder Stahlbolzen (St 37) von 3 mm Durchmesser im Abstand von 25 mm von der Einspannstelle belastet werden darf (Bild 80/1)!

Gegeben:

$$d = 3 \text{ mm}$$

$$l = 25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{b,zul} = 130 \text{ N/mm}^2$$

Gesucht:

W

M_b

F_b

Lösung:

$$W = \frac{d^3}{10}$$

$$M_b = W \cdot \sigma_{b,zul}$$

$$W = \frac{27 \text{ mm}^3}{10}$$

$$M_b = 2,7 \text{ mm}^3 \cdot 130 \text{ N/mm}^2$$

$$W = 2,7 \text{ mm}^3$$

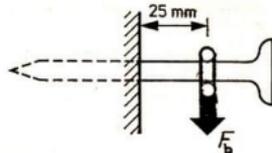
$$M_b = 351 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_b = F_b \cdot l$$

$$F_b = \frac{M_b}{l}$$

$$F_b = \frac{351 \text{ N} \cdot \text{mm}}{25 \text{ mm}}$$

$$F_b = 14 \text{ N}$$



80/1

Auf Biegung beanspruchter Nagel

- Wie hoch muß der Querschnitt einer Holzleiste von 3 mm Breite für den Holm eines Flugmodelltragflügels gewählt werden, wenn am Holmende ($l = 700 \text{ mm}$) eine Kraft von 4 N angreifen kann (Bild 81/1)? Die Leiste ist als einseitig eingespannter Träger zu betrachten.

Gegeben:

$$b = 3 \text{ mm}$$

$$l = 700 \text{ mm}$$

$$F_b = 4 \text{ N}$$

$$\sigma_{b,zul} = 13 \text{ N/mm}^2$$

Gesucht:

M_b

W_{erf}

h

Lösung:

$$M_b = F_b \cdot l$$

$$M_b = 4 \text{ N} \cdot 700 \text{ mm}$$

$$M_b = 2800 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$W_{\text{erf}} = \frac{M_b}{\sigma_{b,zul}}$$

$$W_{\text{erf}} = \frac{2800 \text{ N} \cdot \text{mm}}{13 \text{ N/mm}^2}$$

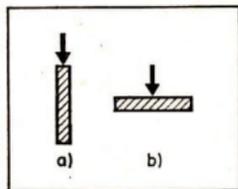
$$W_{\text{erf}} = 215 \text{ mm}^3$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

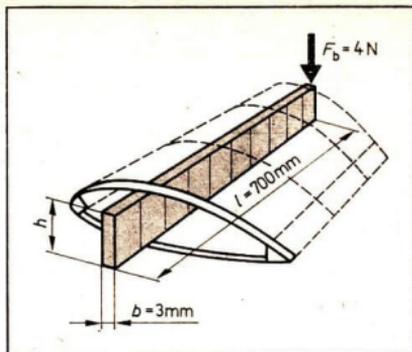
$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot W}{b}}$$

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot 215 \text{ mm}^3}{3 \text{ mm}}}$$

$$h \approx 21 \text{ mm}$$



81/2



- Weisen Sie nach, daß die Holzleiste des Tragflügelholmes nach Bild 81/2 b die Belastung nicht aushält!
- Prüfen Sie nach, welchen Einfluß die Verwendung eines quadratischen Querschnittes der Leiste auf die Masse haben würde!

Gegeben:

$$A_{\square} = 63 \text{ mm}^2$$

Gesucht:

$$A_{\square}$$

Lösung:

$$W = \frac{h^3}{6}$$

$$A_{\square} \cong A_{\square}$$

$$h = \sqrt[3]{6 \cdot W}$$

$$63 \text{ mm}^2 < 121 \text{ mm}^2$$

$$h = \sqrt[3]{6 \cdot 215 \text{ mm}^3}$$

$$\underline{\underline{h \approx 11 \text{ mm}}}$$

Der quadratische Querschnitt der Leiste ist etwa doppelt so groß wie der Rechteckquerschnitt (hochkant) bei gleicher Festigkeit; demzufolge ist die Masse der quadratischen Leiste etwa doppelt so groß wie die der Rechteckleiste! ①

Bei allen Körpern, an denen Biegung auftritt, spielt die Elastizität des Werkstoffes eine große Rolle. Je elastischer ein Werkstoff ist, um so besser eignet er sich für Bauteile, die bei Belastung nachgeben müssen, ohne dabei zu Bruch zu gehen, und die bei Entlastung ihre alte Form wieder erlangen.

Fahrzeugfedern. Für technische Belange bedeutungsvoll sind solche elastischen Verformungen, bei denen eine große mechanische Arbeit verrichtet wird. Man bezeichnet solche Bauteile als Federn. ②

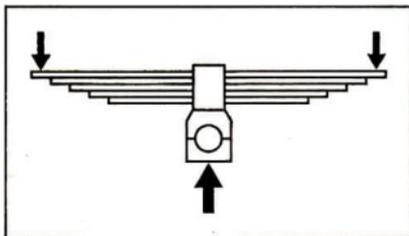
Fast alle Straßen- und Schienenfahrzeuge sind gefedert.

-
- ① Weisen Sie nach, daß für dieses Beispiel (wie für die meisten Beispiele aus der Technik) richtig gilt $m \sim A$!
- ② Arbeiten Sie im Lehrbuch Physik Kl. 7 den Abschnitt „Arbeit bei elastischer Verformung“ durch!

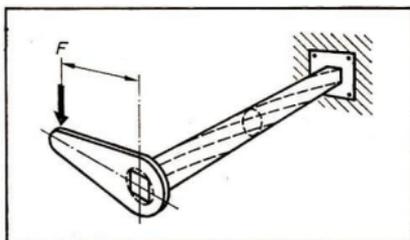
Als Werkstoffe für Federn kommen infrage:

Werkstoff	Eigenschaften	
	günstige	ungünstige
Federstahl $\sigma_{b,zul} = 750 \text{ N/mm}^2$	verschleißfest große Belastungs- fähigkeit	
Gummi $\sigma_{b,zul} = 7 \text{ N/mm}^2$	sehr geringe Belastungsfähigkeit	starke Dehnung (600%) wärmeempfindlich, nur Zug- oder Druckbelastung möglich
Messing $\sigma_{b,zul} = 200 \text{ N/mm}^2$	korrosionsbeständig	geringe Belastungsfähigkeit, Feder ermüdet leicht

Für die Fahrzeugfederung wurden viele Arten von Federn entwickelt. Federn werden durch die Belastung entweder gebogen, gezogen, gedrückt oder verdreht (Bilder 82/1 bis 82/4).

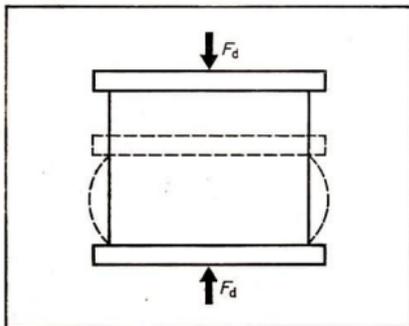


82/1 Geschichtete Blattfeder
(Schienenfahrzeuge, Straßenfahrzeuge)

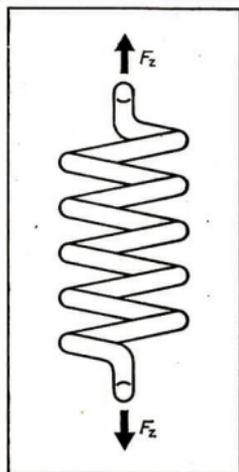


82/2 Drehstabfedern
(Kfz-Federn)

82/3 Gummi – Druckfeder
(Motorenbefestigung, Schwingungs-
und Geräuschdämpfer)



82/4 Zylindrische
Schraubenfeder
(Ventilfedern,
Kfz-Federn)



Federnde Bauteile. Auf Grund der Elastizität der Werkstoffe ist jedes Bauteil mehr oder weniger elastisch. In der Technik bezeichnet man jedes nach Bild 83/1 eingespannte und belastete Teil als **Träger**.

Um die Durchbiegung eines Trägers gering und die Belastungsfähigkeit bei geringem Werkstoffaufwand oder geringer Masse des Trägers so groß wie möglich zu machen, wendet man verschiedene konstruktive Lösungsmöglichkeiten an. Sie sind darauf gerichtet, die Querschnittsfläche des Trägers so gering wie möglich und das Widerstandsmoment gegen Biegung so groß wie möglich zu machen. ①

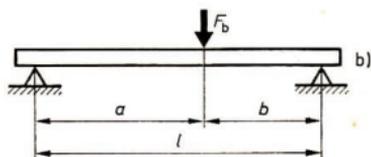
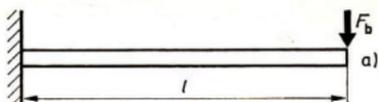
Brückenträger (Bild 83/2) und Holme in Flugzeugtragflügeln (Bild 83/3) haben die gleiche Funktion und ähneln demzufolge in ihrem Aufbau einander sehr stark. In dem Bemühen, mit möglichst wenig Werkstoff eine hohe Widerstandskraft gegen Biegen zu erhalten, werden meist dünnwandige, hohe Stege so angeordnet, daß sie auch gegen seitliches Ausknicken und Verdrehen möglichst sicher sind.

Der abgebildete Brückenträger hat eine Spannweite von 10,0 m und eine Steghöhe von etwa 1100 mm. Er besteht aus Stahl (St 37) und wird von der eigenen Masse und von der Verkehrslast mit einer Kraft von etwa 900000 N belastet. Dabei biegt sich der Brückenträger um etwa 6 mm durch.

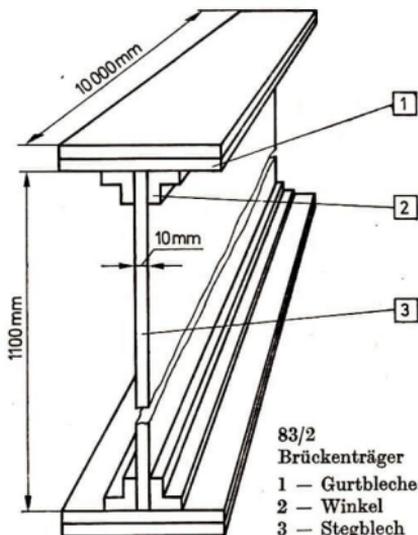
Ganz andere Bedingungen zwingen den Konstrukteur eines Tragflügelholmes, nach geeigneten Lösungen zu suchen. Durch die Profilhöhe des Tragflügelprofils ist die Steghöhe des Holmes vorgegeben; sie kann also nicht beliebig groß gewählt werden. Vor allem bei Segelflugzeugen ist aus strömungstechnischen Gründen die Profilhöhe sehr niedrig, und die Spannweite eines solchen Flügels ist außerdem meist sehr groß.

83/3 Holm in einem Segelflugzeug-Tragflügel

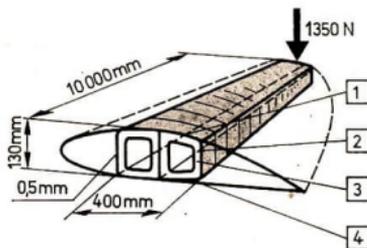
- | | |
|--------------|---------------|
| 1 – Obergurt | 3 – Spant |
| 2 – Steg | 4 – Untergurt |



83/1 Träger
a) einseitig gelagert b) zweiseitig gelagert



83/2
Brückenträger
1 – Gurtbleche
2 – Winkel
3 – Stegblech



- ① Fertigen Sie Skizzen – möglichst mit Maßeintragungen – von Trägern an, wie zum Beispiel Hochspannungsmast, Baurüstung, alte Stahlfachwerkbrücke, Lastkraftwagen, Kranarm, Schreibmaschinentypenhebel u. a.!

Der Holm eines Versuchsegelflugezeuges ließ zum Beispiel eine Steghöhe von nur 130 mm zu, die Länge betrug aber 10000 mm. Da solch ein Tragflügel nicht nur fest, sondern auch sehr leicht sein muß, wurde für die Belastung von 1350 N ein Holm mit mehreren Stegen von jeweils nur 0,5 mm dickem Blech einer Aluminiumlegierung konstruiert. Trotz des sehr dünnen Baumaterials konnte bei einer Breite des Holmes von etwa 400 mm erreicht werden, daß sich die Tragflügelenden bei normaler Belastung im Flug um nur etwa 40 mm nach oben durchbogen.

Solche konstruktiv komplizierten Aufgaben können nur mit umfangreichen Berechnungen gelöst werden. Trotzdem baut man speziell bei Flugzeugteilen nach der Berechnung zunächst Versuchsmusterteile. Diese prüft man dann im Labor, bei welcher Überbelastung sie zu Bruch gehen. Dabei werden Belastungen erreicht, die das Zwanzigfache der Normalbelastung betragen.

Wenn man die Frage beantworten will, wie es möglich ist, daß so dünne Bauteile so große Belastungen aushalten, für die sie aus Erfahrungs- und Prüfwerten errechnet werden können, dann muß man das innere Gefüge des Werkstoffes untersuchen.

Kristallaufbau der Festkörper

Metalle gehören zu den Festkörpern; sie haben einen kristallinen Aufbau. Der kristalline Aufbau kann bei der Betrachtung von Metallbruchflächen festgestellt werden (Bild 84/1). Die Besonderheit kristalliner Stoffe besteht in ihrer Zusammensetzung aus vielen einzelnen Kristallen. Als Kristall bezeichnet man einen Festkörper, der von gleichmäßig ausgebildeten, ebenen Flächen begrenzt wird (Bild 84/2).

Kristallgitter. Wie alle Stoffe, so sind auch kristalline Stoffe aus Teilchen aufgebaut. Die räumliche Anordnung der Teilchen in einem Kristall hat die Form eines Gitters (Bild 85/1).

Das Kristallgitter kann mit besonderen Röntgenverfahren, bei denen die Röntgenwellen an den Gitterbausteinen gebeugt werden, sichtbar aufgezeichnet werden (Bild 85/2). Ein einfaches Kristallgitter entsteht, wenn sich Teilchen eines Stoffes zu einem Kristall zusammenfügen. Zeichnerisch wird ein solches Gitter dargestellt, indem man an Stelle der Teilchen Punkte zeichnet und diese Punkte durch Linien verbindet (Bild 85/3).



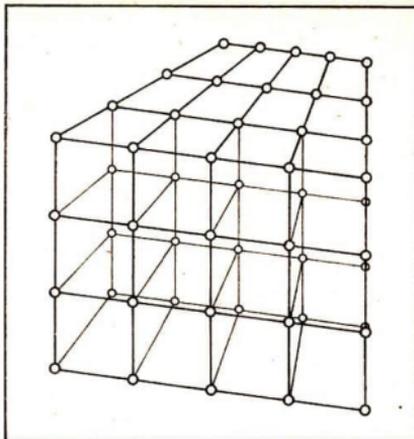
84/1 Bruchfläche eines metallischen Festkörpers

84/2 Kristall

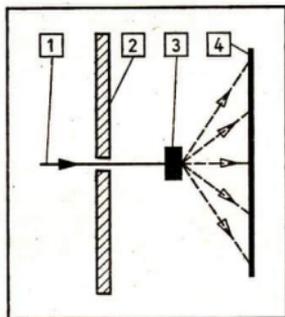
Die im Bild 85/3 hervorgehobene kleinste Einheit des dargestellten Punktgitters bezeichnet man als **Elementarzelle**. ①

Die Abstände a , b , c zweier Punkte in einer Elementarzelle bezeichnet man als **Gitterkonstante**. Die Gitterkonstante liegt für Metalle bei etwa 10^{-7} mm.

Komplizierte Kristallgitter entstehen, wenn sich Teilchen verschiedener Stoffe zu einem Kristall zusammenfügen. Dabei liegen die einfachen Punktgitter der Teilchen jedes einzelnen Stoffes ineinander verschachtelt (Bilder 86/1 und 86/2).

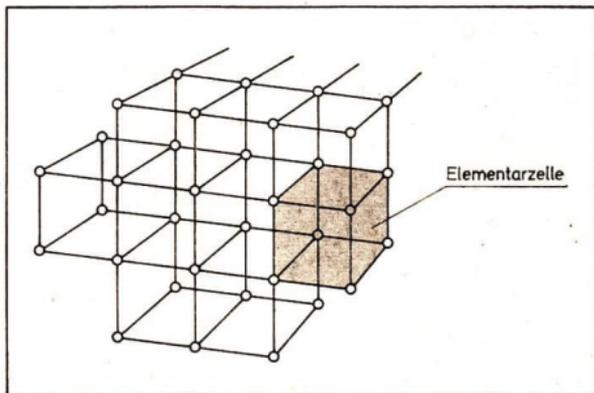
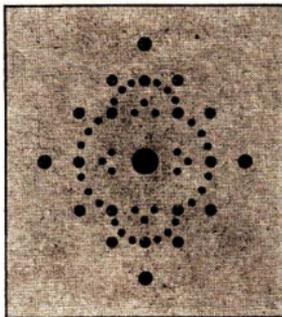


85/1
Gitterstruktur eines
kristallinen Stoffes



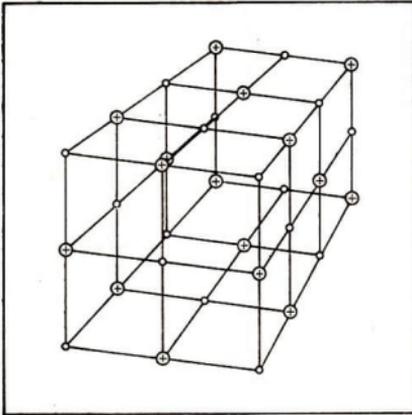
85/2
Prinzipieller Aufbau
zur Röntgen-Untersuchung
von Kristallen
nach dem Laue-Verfahren

- 1 — Primärwelle
- 2 — Blende
- 3 — Kristall
- 4 — Röntgenfilm



85/3
Punktgitter und
Elementarzelle

- ① Bauen Sie aus Baukastenwürfeln gleicher Größe einen zusammengesetzten Körper als Modell eines kristallinen Körpers und demonstrieren Sie eine Elementarzelle!

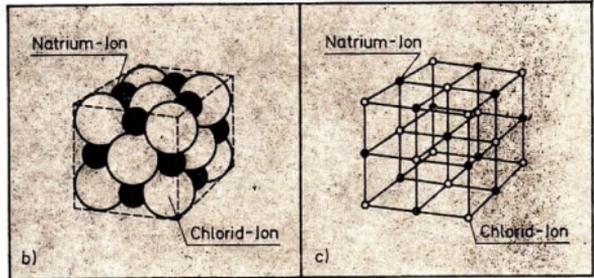
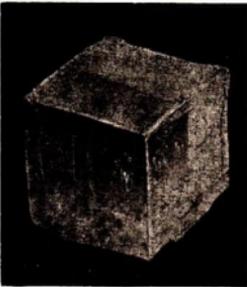


86/1

Beim Natrium-Chlorid-Kristall
sind zwei Punktgitter ineinandergeschoben

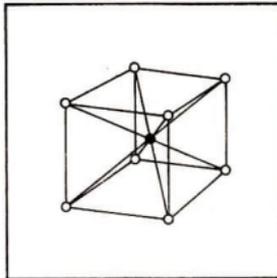
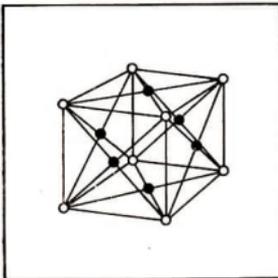
86/2 Natrium-Chlorid-Kristall als

- Realkristall
- räumliches Modell
- Gittermodell



Raumgitter. In einem Metallkristall ordnen sich die Teilchen in bestimmten Gitterformen an. Die wesentlichen Gitterformen sind das

- kubisch-flächenzentrierte Gitter (Bild 86/3) bei Silber, Aluminium, Gold, Kupfer, Kalzium, Blei, Eisen, Nickel, Platin;
- kubisch-raumzentrierte Gitter (Bild 86/4) bei Eisen, Chrom, Molybdän, Tantal, Wolfram;
- hexagonale Gitter (Bild 87/1) bei Kadmium, Magnesium, Zink, Titan, Kobalt;
- tetragonale Gitter (Bild 87/2) bei Zinn.



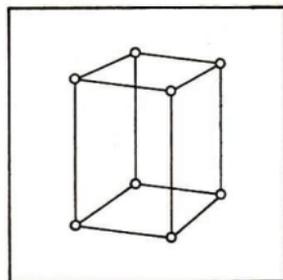
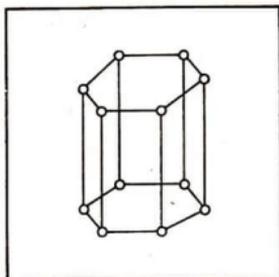
86/3

Kristallgitter
kubisch-flächenzentriert

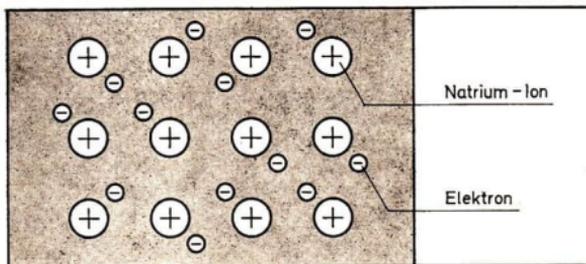
86/4

Kristallgitter
kubisch-raumzentriert

87/1
 Kristallgitter
 hexagonale Anordnung



87/2
 Kristallgitter
 tetragonale Anordnung



87/3
 Modell der Metallbindung
 bei Natrium

Metallbindung. Die einzelnen Teilchen eines Kristalls werden durch elektrische Kräfte zusammengehalten. Sie beruhen auf der Anziehung zwischen Metall-Ionen und frei beweglichen Elektronen (Bild 87/3), die sich im ständigen Austausch zwischen den Metall-Ionen befinden.

Kristallisation. In Metallschmelzen bilden sich bei Abkühlung Kristallisationskeime. Um diese Keime gruppieren sich die Metall-Ionen entsprechend einer der Raumgitterformen. Diese Gebilde wachsen beim Erstarren der Schmelze nach allen Seiten, wobei die Bindungsenergie der Teilchen zunimmt.

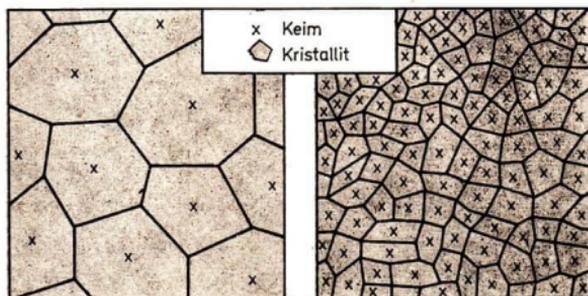
Man bezeichnet die Raumgitter als **Kristallite**. Diese Kristallite bestehen stets aus einer bestimmten Atomart.

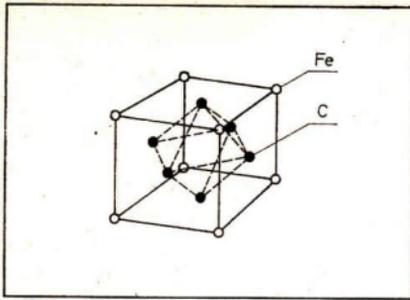
3
 ▼

Das Wachsen verschiedener Kristalle kann sichtbar gemacht werden, indem man einen Tropfen Kochsalzlösung bzw. Natriumkarbonatlösung auf je einen Objektträger gibt und diese unter dem Mikroskop beobachtet.

Weil sich die Kristallite in einer Schmelze nicht gleichmäßig ausgerichtet befinden,

87/4
 Einfluß der Anzahl
 der Kristallisationskeime
 auf die Ausbildung
 des Gefüges
 links: grobkörnig
 rechts: feinkörnig



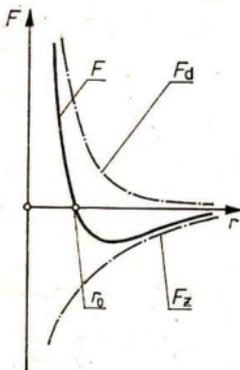


88/1 Eisenkarbid-Mischkristall (Fe - Fe₃C)

Mischkristalle bestehen aus einem Gemisch verschiedener Atomarten. Dabei nehmen Fremdstoffatome einzelne Gitterplätze im Kristallgefüge ein. Bekannteste Mischkristalle sind Kristallite aus Eisen (Fe) und Eisenkarbid (Fe₃C). Man bezeichnet diesen Werkstoff (Bild 88/1) als Stahl, wenn der Kohlenstoffgehalt zwischen 0,9% und 1,7% beträgt. Je nach dem Anteil des Eisenkarbids im Eisen hat der Stahl verschiedene mechanische und technologische Eigenschaften (Festigkeit, Elastizität, elektrische Leitfähigkeit usw.).

Wechselwirkungskräfte zwischen Kristallbausteinen

Eine elastische Verformung, so wie sie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (S. 73) beschrieben wurde, läßt sich mit Hilfe molekular-kinetischer Vorstellungen durch Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen und der Abhängigkeit dieser Kräfte vom Abstand der Teilchen erklären.



88/2 Abhängigkeit der Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen von ihrem gegenseitigen Abstand

F_z : Abstoßungskraft

F_d : Anziehungskraft

r_0 : Gleichgewichtsabstand

Es gilt: $F = F_1 + F_2$

wachsen sie bei weiterer Kristallisation in verschiedenen Richtungen und bilden beim Zusammentreffen mit anderen Kristalliten deutliche Grenzen.

Diese verschiedene Anordnung der Kristallite bezeichnet man als das Gefüge des Metalls oder des Stoffes, während man die einzelnen Kristallite als geschlossenes Gebilde Körner nennt. Das Gefüge besitzt demzufolge eine körnige Struktur. Die Anzahl der in einer Schmelze vorhandenen Kristallisationskeime ist entscheidend dafür, ob ein grob- oder ein feinkörniges Gefüge beim Kristallisieren entsteht (Bild 87/4).

Dem Gleichgewichtszustand der Kräfte entspricht ein Minimum an potentieller Energie. Bei der elastischen Verformung verändern sich die Abstände zwischen den Teilchen. Im Falle der Dehnung wird der Abstand größer, und die Anziehungskraft wird größer als die Abstoßungskraft. Die potentielle Energie nimmt dabei zu. Bei einer Zunahme der potentiellen Energie der Moleküle (Atome) nimmt die innere Energie des Versuchsobjektes zu. Wenn die Spannung aufhört, wächst infolge der überschüssigen Energie die Elastizitätskraft an. Die Teilchen werden in ihre Ausgangslage zurückgebracht. Die innere Energie bekommt erneut einen minimalen Wert.

Die elastische Verformung läßt somit eine energetische Betrachtung zu. Zwischen den Teilchen eines Stoffes wirkt eine abstoßende Kraft. Festkörper und Flüssig-

keiten lassen sich bekanntlich wenig zusammendrücken. Untersuchungen haben ergeben, daß die abstoßende Kraft sehr stark mit geringer werdendem Abstand r zunimmt (Bild 88/2).

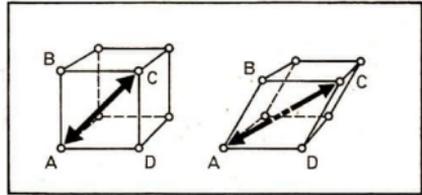
Versucht man die Teilchen aus ihrer Normallage auseinanderzuziehen, dann ist hierzu ebenfalls eine Kraft erforderlich, um die anziehende Kraft F_z zu überwinden.

Führen Sie ein Experiment nach PSV 1/2, V 2.3.6. durch! Lesen Sie außerdem in Podgornowa/Kondakow „Aus der Festkörperphysik“, S. 30/31 nach!

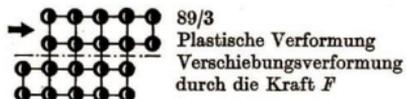
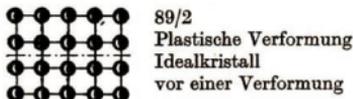
Elastische und plastische Verformung. Die Formelastizität läßt sich am Bild 89/1 erklären. Beim einfachsten Würfelgitter vollzieht sich infolge der Verformung die Umwandlung des Würfels in ein schiefwinkliges Parallelepiped. Die Diagonale AC

89/1

Entstehung der Formelastizität durch Umwandlung eines Würfelgitters in ein schiefwinkliges Parallelepiped infolge Krafteinwirkung

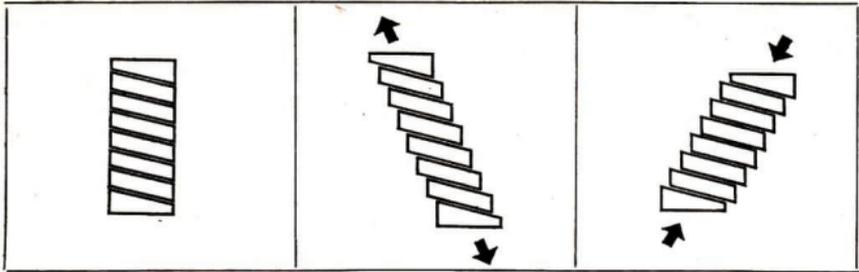


wird länger, während BD kürzer wird. Zwischen den Teilchen A und C wird die Anziehungskraft und zwischen den Teilchen B und D die Abstoßungskraft größer. Im Ergebnis treten reversible elastische Kräfte auf, durch die die ursprüngliche Form des Körpers wieder hergestellt wird, wenn die verformende Kraft aufhört zu wirken. Bei einem plastischen Gleitvorgang (Belastung des Festkörpers über die Fließgrenze hinaus) wird durch die Einwirkung einer äußeren Kraft ein Teil des Kristalls längs einer atomaren Ebene in bezug zu einer anderen Ebene so verschoben, daß sich die neue Lage der Atome zueinander ihrem Wesen nach nicht von der ursprünglichen Lage unterscheidet (Bilder 89/2 und 89/3). Die potentielle Energie der Wechselwir-



kung bleibt minimal. Reversible elastische Kräfte treten nicht auf. Durch die bei der Verformung zugeführte Energie erhöht sich allerdings die kinetische Energie der Teilchen, das heißt, der Körper erwärmt sich. Die plastische Verformung bei Dehnung und bei Kompression reduziert sich ebenfalls (Bild 90/1, 90/2 und 90/3) auf die Verschiebung von atomaren Ebenen parallel zu anderen. Die an der Oberfläche des Kristalls auftretenden kleinen Stufen lassen sich unter dem Mikroskop als sogenannte Gleitlinien (vgl. S. 98) beobachten.

Den Gleitvorgang bei einer plastischen Verformung kann man mit mechanischen Vorgängen beschreiben. Es läßt sich vorstellen, daß unter der Einwirkung einer äußeren Kraft schlagartig alle Bindungen zwischen den Atomen zweier benachbarter atomarer Ebenen gelöst werden. Die Verschiebung tritt ein, und danach entstehen neue Bindungen. Aus der Größe der Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen — diese sind für verschiedene Bindungstypen unterschiedlich groß — läßt sich theoretisch jene Spannung ermitteln, die zur gleichzeitigen Lösung aller Bindungen zwischen den benachbarten atomaren Ebenen erforderlich wäre. Für Metalle erhält man eine Spannung,



90/1
Plastische Verformung
Modell eines nicht
verformten Einkristalls

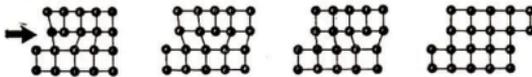
90/2
Plastische Verformung
Dehnungsverformung –
Gleiten der Schichten
entlang der Gleitebenen

90/3
Plastische Verformung
Druckverformung – Gleiten
der Schichten entlang der
Gleitebenen

die in der Größenordnung von 10^4 N/mm^2 liegt. Wie jedoch Versuche ergeben haben, setzt die plastische Verformung schon bei Belastungen ein, die einige Größenordnungen kleiner sind. Die Annahme eines Verschiebungsmechanismus entlang der atomaren Ebenen, für den die theoretische Berechnung durchgeführt wurde, entspricht offensichtlich nicht dem tatsächlichen Sachverhalt.

Für das Auftreten einer plastischen Verformung besteht nicht die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Lösung aller Bindungen, die zwischen zwei Ebenen bestehen. Es reicht aus, wenn sich eine kleine Anzahl von Bindungen gleichzeitig löst.

Diese Abweichung zwischen Theorie und Praxis war einer der Gründe, die zur Vorstellung von Kristallbaufehlern führte, speziell zur Annahme vom Vorhandensein von Versetzungen. Die Versetzungstheorie der plastischen Verformung ist heute allgemein anerkannt. Vom Standpunkt dieser Theorie ist die plastische Verformung gewöhnlich mit einer Bewegung von Versetzungen verbunden. Den einfachsten Fall stellt die Bewegung einer Randversetzung dar. Die Umgruppierung der Bindungen erfolgt nacheinander (Bild 90/4). Man kann den Vorgang gleichsam mit der Weitergabe eines Stafettenstabes – dem Stabwechsel – vergleichen. Zur gleichen Zeit ist immer nur eine sehr geringe Anzahl von Atomen am Verformungsprozeß beteiligt. Dadurch erklärt sich der niedrige Wert der Spannung, die für eine plastische Verformung erforderlich ist.



90/4 Gleitvorgang bei einer
plastischen Verformung infolge
der Einwirkung einer Kraft

Alle solchen Kristalldefekte (Versetzungen) bilden jedoch gleichzeitig ein Hindernis für die Bewegung der Versetzungen.

Metallographische Untersuchung

Das Gefüge eines kristallinen Festkörpers gibt über verschiedene Eigenschaften Aufschluß. Um das Gefüge sichtbar zu machen, muß man zunächst eine ebene Schlißfläche auf dem Festkörper herstellen. Dieser Schliß wird geätzt. Danach kann das Schlißbild mit dem Mikroskop betrachtet werden.

Aus dem Vergleich mit Schlibbildern von Festkörpern bekannter Eigenschaften und Zusammensetzung kann man dann auf die Eigenschaften und die Zusammensetzung und in vielen Fällen auch auf den Bearbeitungszustand des untersuchten Festkörpers schließen. Für solche Vergleiche stehen dem Metallographen Kataloge mit Schlibbildern zur Verfügung.

Schleifen. Aus dem zu untersuchenden Festkörper wird ein Prüfstück von möglichst 10 mm Dicke und etwa 200 mm² Prüffläche herausgetrennt. Beim Heraustrennen muß man vorsichtig arbeiten, damit nicht durch thermischen Einfluß und mechanische Einwirkung das Gefügebild verändert wird.

Achtung: Beim Sägen, Bohren und Abdrehen erwärmt sich das Prüfstück örtlich sehr leicht auf über 150 °C.

Beim Biegen, Abscheren und Meißeln wird das Gefüge örtlich gepreßt, gestreckt, gestaucht, verzerrt und verdichtet.

Das Prüfstück wird zunächst an einer groben Schmirgelscheibe eben geschliffen. Danach wird mit einer Feinschleifscheibe unter Verwendung von Schmirgel- und Schleifleinen bis zur Körnung 0000 die Fläche geschliffen.

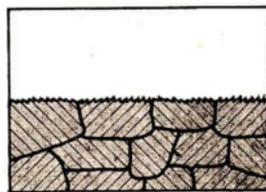
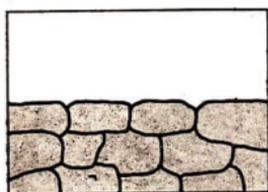
Nach jedem Schleifgang wird das Prüfstück um 90° gedreht. Abschließend wird an einer Schwabbelscheibe mit Poliermittel poliert.

Das Schleifen erfolgt trocken bis zur Körnung 00, von da ab kann ein wenig Öl zugegeben werden.

Ätzen. Das Gefüge an der polierten Schlibfläche kann man durch Ätzen, durch Einwirken einer Säure oder einer Lauge, sichtbar machen. Beim Ätzen können entweder die **Korngrenzen** oder die **Kornflächen** sichtbar werden (Bild 91/1).

Bei der Korngrenzenätzung wird an den Korngrenzen der Werkstoff durch das Ätzmittel abgetragen. Es entstehen Furchen um die Kornflächen herum, die als dunkle Linien unter dem Mikroskop zu erkennen sind.

Werkstoff	Poliermittel
alle Metalle	Chromoxid (Poliergrün)
harte Metalle	Aluminiumoxid (Tonerde) in destilliertem Wasser
weiche Metalle (Zinn, Blei)	Eisenoxid (Polierrot)
Leichtmetalle	Magnesiumoxid



91/1
Mikrographische Aufnahme und Prinzipskizzen von Metallgefügen
links: Korngrenzenätzung
rechts: Kornflächenätzung

Bei der Kornflächenätzung werden die Kornflächen entsprechend der unterschiedlichen Lage der Kristallite zur Korn-(schliff)-fläche unterschiedlich stark durch das Ätzmittel abgetragen. Es entstehen unterschiedlich dunkel gefärbte Flächen.

Werkstoff	Ätzmittel
Stahl	alkoholische Salpetersäure, Pikrinsäure, Kupferammoniumchlorid
Kupfer, Kupferlegierungen	salzsäurehaltige Eisenchloridlösung Ammoniumsulfat
Aluminium, Aluminiumlegierungen	2% ige Flußsäure, Salpetersäure-Lösung, Natriumlauge
Magnesium, Magnesiumlegierungen	Salzsäure stark verdünnt

Ein besonders einfaches und schnelles Prüfverfahren ist die **Baumannprobe** zum Nachweis von Schwefel und Phosphor im Stahlgefüge (Bild 92/1).

Phosphor- und Schwefelkristallite zeichnen sich im Baumannabdruck als dunkelbraune Punkte auf der hellbraun gefärbten Abdruckfläche des Probekörpers ab.

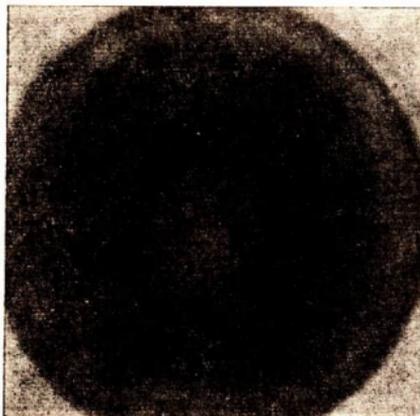
Die Schlifffläche des Probekörpers wird entfettet.

Ein Stückchen Fotopapier wird in 5% ige Schwefelsäure getaucht und sofort auf die Schlifffläche gedrückt. Nach 1 bis 2 Minuten wird das Fotopapier abgenommen, fixiert und gewässert. Die Baumannprobe wird bei Tageslicht durchgeführt.

92/1

Baumannprobe eines Rundstahls

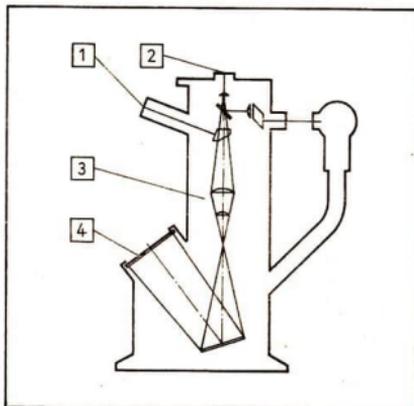
Der Abdruck zeigt, daß die Phosphor- und Schwefelkristallite im Innern des Rundstahls zusammengedrängt sind; an der Oberfläche ist der Rundstahl von solchen Kristalliten im wesentlichen frei



92/2

Metallmikroskop

- 1 — Einblickokular
- 2 — Probekörper mit Schlifffläche
- 3 — Fotookular
- 4 — Mattscheibe



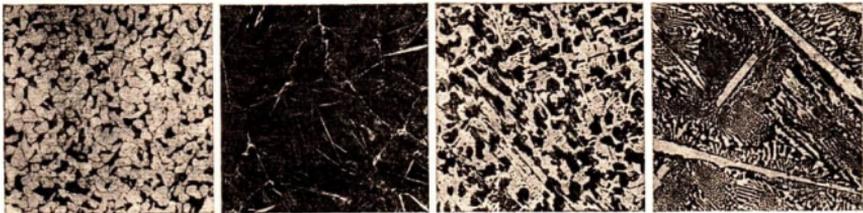
Mikroskopische Untersuchung. Bei mikroskopischer Betrachtung der geätzten Schlibfbilder kann man das Gefüge der Metallegierung erkennen. Die verschiedenen Kristallite zeichnen sich deutlich an der Schlibffläche ab. Wesentlich ist, daß man für die Betrachtung verschiedener Festkörperproben stets die gleiche Vergrößerung des Bildes wählt, um genaue Vergleichsmöglichkeiten zu haben.

Beim Metallmikroskop (Bild 92/2) wird auffallendes Licht verwendet, da es im allgemeinen nicht üblich und meist auch nicht möglich ist, so dünne Schlibfe anzufertigen, daß diese lichtdurchlässig sind.

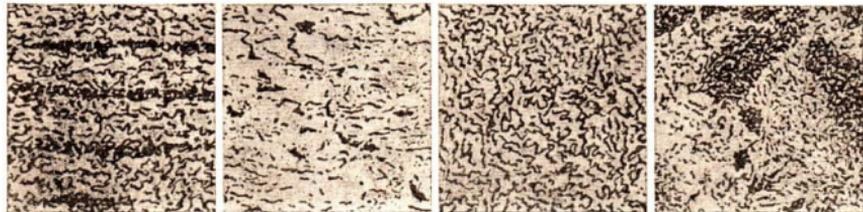
Die erhaltenen Bilder werden mit katalogisierten Bildern (Bild 93/1) verglichen. Aus den Katalogangaben kann man wesentliche Angaben über die stoffliche Zusammensetzung, den Abkühlungsprozeß der Schmelze und verschiedene mechanische und technologische Eigenschaften wie Festigkeit und Härte, Härbarkeit und Verformbarkeit der dort dargestellten Probe entnehmen und diese auf das verglichene Probenmaterial übertragen. Solche Aufgaben löst im Werkstoffprüflabor metallurgischer und metallverarbeitender Betriebe und Institute der Metallograph.

93/1 Schlibfbilder von

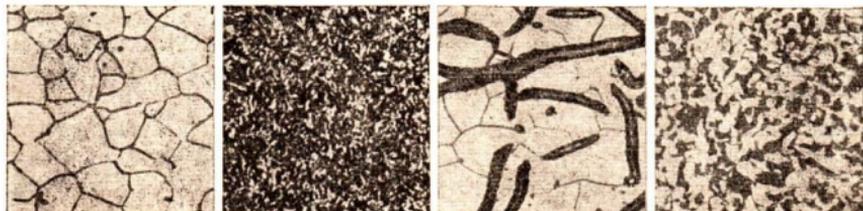
a) Stahl und Roheisen mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt
0,18% C; 1,2% C; 2,5% C; 4,3% C



b) Stahl mit verschiedener Behandlungsart
geschmiedet; gereckt; gehärtet; angelassen



c) verschiedenen Metallsorten
Eisen; Stahl; Grauguß; Stahlguß

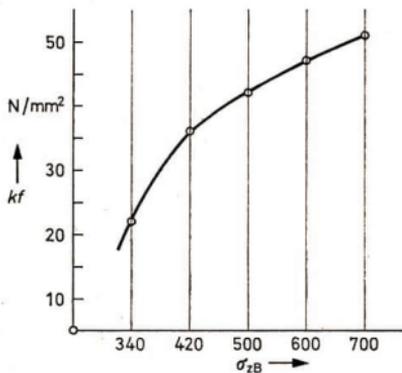


Spanlose Formgebung

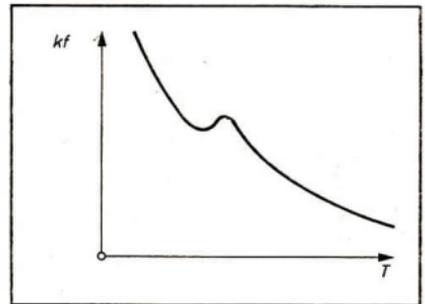
Bei der Fertigung von Werkstücken wird aus einem Rohkörper ein Fertigteil hergestellt. Dabei kommt es unter anderem aus ökonomischen Gründen darauf an, daß der Rohkörper möglichst nur soviel oder nur wenig mehr Werkstoff enthält als das Fertigteil, damit möglichst wenig Werkstoffabfall entsteht. Das erreicht man sehr gut bei Anwendung der (spanlosen) Umformung.

Formbarkeit der Werkstoffe. Die Formbarkeit der Metalle ist je nach ihrem Gefüge- und Kristallaufbau verschieden gut. Sie beruht darauf, daß die Kristallite bei mechanischer Belastung, bei der die Fließgrenze überschritten wird, Verschiebungen gestatten. Bei diesen Verschiebungen wird der Zusammenhang der aufeinander gleitenden Schichten nicht zerstört.

Versuche haben ergeben, daß die Umformspannungen k_f der Metalle vom Werkstoff und von der Temperatur abhängen (Bilder 94/1 und 94/2).



94/1
Abhängigkeit der Umformspannung k_f
vom Werkstoff



94/2
Abhängigkeit der Umformspannung k_f
von der Temperatur

Schmieden. Beim Schmieden wird der Werkstoff des Werkstückes durch eine schlagartig einwirkende Kraft verformt. Die erforderliche Kraft muß so groß sein, daß kurzzeitig im Werkstoff die Umformspannung erreicht wird.

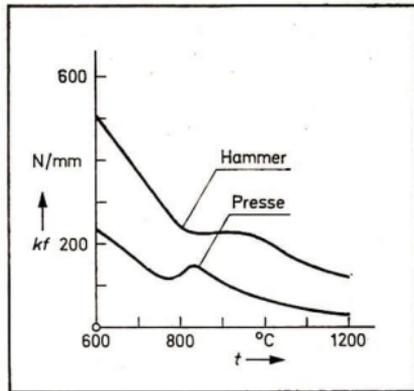
Beim Schmieden bleibt das Volumen des Werkstoffes gleich. Beim Schmieden ist die erforderliche Umformspannung sehr hoch, weil die Umformung schlagartig, also sehr schnell erfolgt. Schmieden erfolgt von Hand (bei kleinen Werkstücken) oder mit Schmiedemaschinen.

Pressen. Beim Pressen wird der Werkstoff des Werkstückes durch langsam und nachhaltig einwirkende Kraft verformt. Beim Pressen ist die erforderliche Umformspannung wesentlich niedriger als beim Schmieden (Bild 95/1). Durch Pressen können auch sehr große Werkstücke umgeformt werden.

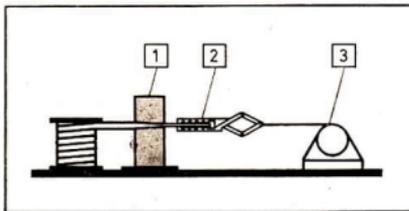
Ziehen. Beim Ziehen wird das Werkstück durch ein lochförmiges Werkzeug gezogen. Dabei verlängert sich das Werkstück und seine Oberfläche wird infolge der kristallinen Gleitvorgänge verdichtet. Im Ziehverfahren werden vor allem Halbzeuge wie Stangen, Rohre, Drähte und Formkörper hergestellt (Bild 95/2).

95/1 Umformspannung k_f in Abhängigkeit von der Temperatur und von der Umformgeschwindigkeit

Walzen. Beim Warmwalzen wird das glühende Werkstück zwischen zwei zylindrischen Walzkörpern hindurchgeführt. Die beiden Walzen drehen sich in zueinander entgegengesetzter Richtung. Das Werkstück wird zwischen den andrückenden Walzen in Längsrichtung gestreckt und gleichzeitig im Querschnitt verringert (Bild 95/3). Beim Kaltwalzen (ohne Wärmezufuhr) wird das Werkstoffgefüge verändert, ebenso die Festigkeit. Die Streckgrenze, die Bruchgrenze und die Härte werden erhöht, die Dehnbarkeit nimmt ab. Zum Kaltumformen eignen sich besonders Stähle bis 1,6% Kohlenstoffgehalt. Je niedriger der Kohlenstoffgehalt, um so größer ist die Kaltumformbarkeit. Reines Eisen ist sehr weich; es ist plastisch. Offensichtlich beeinflusst die Anwesenheit von Kohlenstoff-(Fremd)-Atomen im Eisen dessen Verformbarkeit.

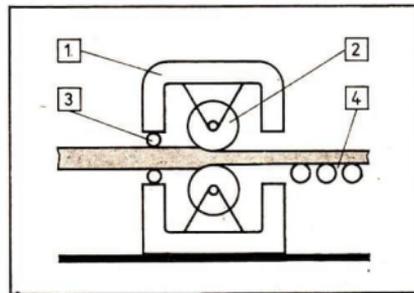


Volkswirtschaftliche Bedeutung. Bei der mechanischen Fertigung werden Festkörperwerkstoffe in Form von Rohkörpern zu Fertigteilen verarbeitet. Festkörperwerkstoffe, vornehmlich Metalle, sind wertvolle Rohstoffe, die zum Teil importiert werden müssen. Ihre Gewinnung ist mit großem Energieaufwand verbunden, in ihnen steckt ein hoher Anteil vergegenständlichter Arbeit. ①



95/2 Blankziehen von Stahldraht auf einer Ziehmaschine

- 1 - Ziehseisen
- 2 - Zange
- 3 - Zugvorrichtung



95/3 Walzen von Blech auf einem Walzwerk

- 1 - Ständer
- 2 - Walzen
- 3 - Führung
- 4 - Rollgang

① Was versteht man unter dem Begriff „vergegenständlichte Arbeit“? Was versteht man unter „lebendiger Arbeit“?

Bei der Fertigung durch Umformen ist der Werkstoffabfall minimal gegenüber der Fertigung durch Zerspanen, wo der Abfall in Form von Spänen in besonderen Fällen über 50% des Rohkörpervolumens ausmacht. Die Wiederzuführung der Zerspanungsabfälle vermindert zwar die echten Werkstoffverluste wesentlich, aber der Aufwand hierfür an Energie und Arbeitskraft ist beträchtlich.

Die spanlose Formgebung erfordert oft weniger Arbeitszeit als die spanende Formgebung.

Aus solchen Gründen ist es vorteilhaft, spanlose Umformtechniken immer dann anzuwenden, wenn das technologisch möglich ist. Das trifft sehr oft auf die Herstellung von Halbzeugen und anderen Massenprodukten zu, in der Endfertigung ist dagegen die Umformtechnik nicht in diesem großen Umfang einsetzbar.

Die Entscheidung über den Einsatz des Fertigungsverfahrens hat der Fertigungsingenieur zu treffen. Wesentlich dabei ist, daß der Konstruktionsingenieur die Teile so dimensioniert und gestaltet, daß ein ökonomisches (werkstoff-, werkzeug- und zeitsparendes) Fertigungsverfahren angewandt werden kann. Deshalb müssen Konstruktions- und Fertigungsingenieur bei der Entwicklung neuer Erzeugnisse sehr eng zusammenwirken.

2. Festigkeit und Werkstoffprüfung

Die Festigkeit ist eine wichtige mechanische Eigenschaft der Werkstoffe. Diese Eigenschaft beruht auf dem Vorhandensein innerer Kräfte (Kohäsion), durch die der Zusammenhalt der Kristallbausteine im Kristallgitter (↗ S. 2/21) gewährleistet wird.

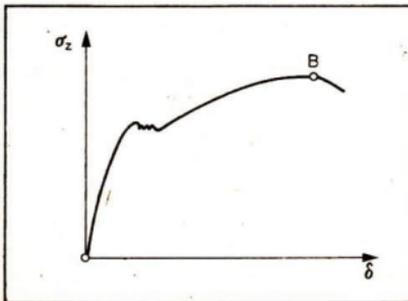
Bei der Belastung eines Körpers durch eine äußere Kraft wirkt die Festigkeit als Widerstand gegen Verformung bzw. Bruch des Körpers. Die Festigkeit ist stoffabhängig.

Festigkeit und Bruchdehnung

Im Abschnitt Belastungsgrenzen ist erläutert worden, wie sich der Werkstoff eines Prüfstabes bei Belastung verhält. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm war die Kurve bis zum Punkt B dargestellt und die in diesem Punkt erreichte Spannung als maximal erreichbar bezeichnet worden.

Bruchgrenze. Erhöht man die Zugbelastung eines dehnbaren Feststoffkörpers, zum Beispiel in Form eines Prüfstabes (vgl. S. 111) über die Fließgrenze hinaus, dann dehnt

sich der Prüfkörper sehr stark, obwohl die Spannung nicht wesentlich vergrößert werden braucht. Der Punkt, in dem die Höchstspannung erreicht ist, wird im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dessen Betrachtung hier nun fortgesetzt werden soll, mit B bezeichnet (Bild 96/1). Die Höchstspannung wird mit σ_{zB} bezeichnet (↗ S. 75). Man nennt diese im Zugversuch maximal erreichbare Spannung



96/1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Bruchgrenze

Bruchfestigkeit eines Werkstoffes (bei Zugbelastung)	$\sigma_{zB} = \frac{F_{max}}{A_0}$	(11)
--	-------------------------------------	------

Einheit der Bruchfestigkeit ist 1 N/mm².

Werkstoff	σ_{zB} in N/mm ²
St 37	370
St 50	500
Federstahl	1500
Stahldraht	bis 2500
Grauguß GG-12	120
Kupfer hart gezogen	400
Messing hart	500
Aluminiumlegierungen Mg-Al	350
Aluminium (hart)	150

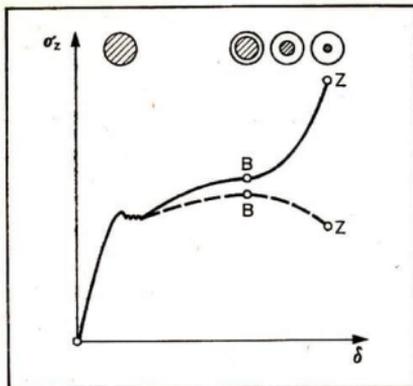
Für nichtmetallische Werkstoffe werden ebenfalls Bruchfestigkeitswerte angegeben.

Bei strukturierten oder gefaserten Stoffen wird dabei unterschieden in längs (||) zur Faserrichtung und in quer (⊥) zur Faserrichtung.

Werkstoff	σ_{zB} in N/mm ²	σ_{bB} in N/mm ²
Eiche	90	90
⊥	5	—
Kiefer	100	90
⊥	3	—
Sperrholz	330	300
Glas	60	—
Polystyrol	40	100
Gummi (Buna)	20	—
Leder	40	—
Hartpapier	120	—

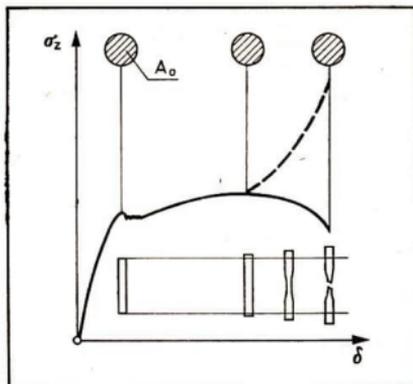
Mit der maximal erreichbaren Spannung verlängert sich der Prüfstab nun sehr stark, während sich sein Querschnitt verringert. Damit nimmt der Anteil der an der Kraftübertragung im Inneren des Prüfstabes beteiligten Kristallgitterbausteine ab. Diese Querschnittsabnahme bei etwa gleichbleibender Belastung bewirkt eine weitere Spannungszunahme. Schließlich bildet sich an einer vorher nicht bestimmbarer Stelle des Prüfstabes eine Einschnürung, die dann sehr schnell zum Bruch des Prüfstabes führt (Bild 98/1). ①

- ① Ahmen Sie den Bruchvorgang eines Probekörpers nach, indem Sie aus Modelliermasse eine dünne Walze formen und diese mit den Händen an den Enden fassend auf Zug belasten, bis der Bruch eintritt! Beobachten Sie dabei die Einschnürstelle und den beim Einschnüren bis zum Bruch spürbar werdenden „Kraftabfall“!
Erklären Sie diese Erscheinung!



98/1

Spannungs-Dehnungs-Diagramm,
bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
des Probstabes



98/2

Spannungs-Dehnungs-Diagramm,
bezogen auf den Anfangsquerschnitt A_0
des Probstabes

An der Oberfläche des zu Bruch gegangenen Prüfstabes kann man die auf Seite 89 beschriebenen Gleitlinien, die auch als Fließlinien bezeichnet werden, erkennen. In der Praxis ist es üblich, die Spannung im Prüfstab auf den ursprünglichen Querschnitt A_0 zu beziehen (obwohl sich dieser bei der Dehnung verringert). Dadurch verläuft die Kurve in den in der Praxis dargestellten Diagrammen anders; sie fällt vom Punkt B an ab (Bild 98/2).

Entwickeln Sie eine Vorrichtung, mit der ein „Prüfstab“ aus Alu-Folie auf Bruchfestigkeit geprüft werden kann, und führen Sie eine Messung durch!

Bruchdehnung. Ein bei der Festigkeitsprüfung zu Bruch gegangener Prüfstab hat eine größere Länge l als die Ausgangslänge l_0 vor der Prüfung.

Dehnung δ
(in Prozent)

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (12)$$

Die Dehnung (bis zum Bruch) ist ein Kennzeichen des Werkstoffes in bezug auf seine Verformbarkeit im kalten Zustand. Biegen, Pressen, Kaltwalzen und Kaltziehen lassen sich um so besser durchführen, je größer die Dehnung ist.

Die Dehnung hängt wiederum sehr stark von der Festigkeit eines bestimmten Werkstoffes wie zum Beispiel bei Stahl ab:

Stahlsorte	σ_{zB} in N/mm^2	δ in %
St 34	340	30
St 60	600	17
Gummi	20	600

Zulässige Spannung

Wie bereits auf S. 75 ausgeführt, dürfen Werkstücke nur bis zu einer bestimmten Spannung weit unter der Bruchfestigkeit belastet werden. Diese zulässige Spannung $\sigma_{z, zul}$ ist von verschiedenen Faktoren abhängig (vgl. Belastungsfälle, S. 100). Bei der Berechnung belasteter Werkstücke setzt man deshalb einen Sicherheitsfaktor ein, wodurch erreicht wird, daß die Festigkeit des Werkstoffes in dem verwendeten Werkstück nur zu einem kleinen Teil beansprucht wird. Der Sicherheitsfaktor ν beträgt im allgemeinen Maschinenbau etwa 4 bis 5, im Kranbau und Aufzugsbau bis zu 10 und im Flugzeugbau zum Beispiel für bestimmte Bauteile bis zu 20.

Danach findet man als zulässige Zugspannung mit Sicherheit gegenüber Bruch

zulässige Spannung $\sigma_{z, zul}$	$\sigma_{z, zul} = \frac{\sigma_{zB}}{\nu}$ (13)
--	--

Die Berücksichtigung aller Sicherheitsfaktoren, gelegentliche geringe Überschreitung der Betriebsbelastung, kleine Werkstofffehler u. a. macht Festigkeitsberechnungen sehr kompliziert. Ein vereinfachtes und in der Praxis anwendbares Schema zum Lösen von Aufgaben besteht in folgendem Verfahren:

Die Berechnung wird in zwei Teilen durchgeführt als

Entwurfsberechnung

Gegeben:

äußere Kraft F
Werkstoff σ_B (Tabelle)
geforderte
Bruchsicherheit $\nu_B(\sigma_{zul})$

Gesucht:

erforderlicher Querschnitt,
der gestellte Bedingung
erfüllt

$$A_{\text{erf}} = \frac{F}{\sigma_{zul}}$$

Kontrollberechnung

Gegeben:

äußere Kraft F
Werkstoff σ_B
zulässige Spannung σ_{zul}

Gesucht:

vorhandene Spannung σ_{vorh}
Vergleich mit der
zulässigen Spannung σ_{zul}

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{F}{A_{\text{vorh}}}$$

Bedingungskontrolle

$$\sigma_{\text{vorh}} < \sigma_{zul}$$

- Eine Zugstange aus Rundstahl soll eine Belastung von 140000 N aufnehmen. Der Durchmesser der Zugstange beträgt 40 mm, die zulässige Spannung 140 N/mm², und die Bruchfestigkeit 450 N/mm². Wie groß ist die Sicherheit der Zugstange gegen Bruch?

Gegeben:

$F_z = 140000 \text{ N}$
 $d = 40 \text{ mm}$
 $\sigma_{z, zul} = 140 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{zB} = 450 \text{ N/mm}^2$

Lösung:

$A_{\text{vorh}} = r^2 \cdot \pi$
 $A_{\text{vorh}} = 1256 \text{ mm}^2$

Gesucht:

A

ν

$$\sigma_{\text{verh}} = \frac{F_z}{A_{\text{vorh}}}$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{140000 \text{ N}}{1256 \text{ mm}^2}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{\text{vorh}} = 112 \text{ N/mm}^2}}$$

$$\nu = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{vorh}}}$$

$$\nu = \frac{450 \text{ N/mm}^2}{112 \text{ N/mm}^2}$$

$$\underline{\underline{\nu \approx 4}}$$

Prüfung: $\sigma_{\text{zul}} \cong \sigma_{\text{vorh}}$

Bedingung:

$$\sigma_{\text{zul}} \geq \sigma_{\text{vorh}}$$

$$\underline{\underline{140 \text{ N/mm}^2 > 112 \text{ N/mm}^2}}$$

Ergebnis:

$$\underline{\underline{\sigma_{\text{vorh}} < \sigma_{\text{zul}}}}$$

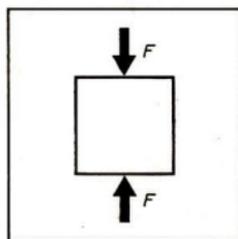
Druckfestigkeit und Zugfestigkeit

Außer Zugbelastung tritt in vielen Fällen an den zu untersuchenden Werkstücken auch Druckbelastung auf. Dabei drückt eine Kraft F_d auf einen Körper, und es entsteht im Flächenquerschnitt eine Druckspannung σ_d (Bild 100/1).

Zug- und Druckspannungen werden nach der gleichen Formel berechnet.

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A} \quad \sigma_d = \frac{F_d}{A}$$

100/1 Druckbelastung eines Probekörpers



Die zulässige Druckspannung ist bei vielen Werkstoffen gleich der zulässigen Zugspannung. Sie muß in jedem Falle aber aus Tabellen abgelesen werden.

Belastungsfälle. Im Maschinenbau treten an Maschinenteilen Belastungen unterschiedlicher Art auf. Anhand zu Bruch gegangener Maschinenteile hat man festgestellt, daß

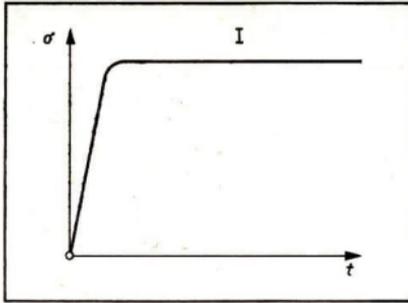
- der Bruch infolge Überbelastung eingetreten ist. Solch ein Bruch ist vermeidbar.

Es treten aber auch — und zwar in der Mehrzahl — Brüche auf, deren Ursachen ganz andere Gründe haben. Man hat durch Untersuchungen festgestellt, daß

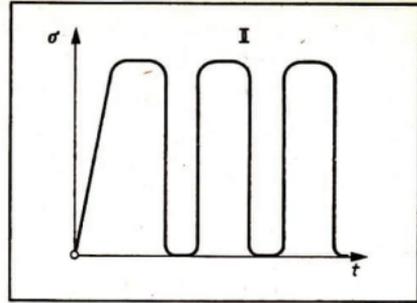
- der Bruch von Maschinenteilen nach **längerdauernder Belastung** eingetreten ist, obwohl (nach der Berechnung) durch die aufgetretene Spannung im Werkstoff die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wurde;
- der Bruch offensichtlich dadurch eingetreten ist, daß das Maschinenteil **nicht gleichmäßig belastet** worden war, obwohl (nach der Berechnung) durch die aufgetretene Spannung im Werkstoff die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wurde.

Um diese verschiedenen Belastungsfälle zu berücksichtigen, wurden in der Technik die zulässigen Spannungswerte in Abhängigkeit vom Belastungsfall festgelegt. Für diese Belastungsfälle hat man zur genaueren Kennzeichnung die Begriffe **statische Festigkeit** und **Dauerfestigkeit** eingeführt. Für einfache Berechnungen sind diese den Belastungsfall berücksichtigenden Festigkeitswerte in Tabellen festgehalten.

Statische Festigkeit (Bild 101/1) ist die Festigkeit eines Werkstoffes, die in dem Falle



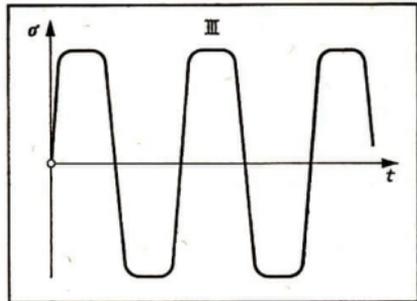
101/1 Spannung bei Lastfall I —
gleichmäßige, ruhende Belastung



101/2 Spannung bei Lastfall II —
Schwellfestigkeit

einer gleichmäßigen, ruhenden Belastung als Lastfall I für Berechnungen einzusetzen ist.

Dauerfestigkeit (Bilder 101/2 und 101/3) ist die Festigkeit eines Werkstoffes, die im Falle wechselnder Belastung von Null bis zu einem Höchstwert von F und wieder auf Null zurückgehend und sich wiederholend als Lastfall II für Berechnungen einzusetzen ist (Schwellfestigkeit) bzw. die im Falle wechselnder Belastung zwischen einem positiven und negativen Höchstwert (Zug und Druck bei einer Pleuelstange oder allseitige Biegung bei einer umlaufenden Welle) als Lastfall III für Berechnungen einzusetzen ist (Wechselfestigkeit).



101/3 Spannung bei Lastfall III —
Wechselfestigkeit

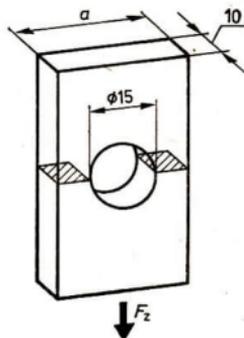
Zulässige Spannungen für den Maschinenbau σ_{zul} in N/mm^2

Werkstoff		St 37	St 50	St 70	GG-12	Federstahl	Cu, hart gezogen	Mg-Al Elektron	Al, hart gewalzt
Zug $\sigma_{z, zul}$	I	120	155	210	40	650	100	80	40
	II	96	135	175	35	520	45	60	—
	III	46	70	89	25	350	30	40	—
Druck $\sigma_{d, zul}$	I	120	155	210	100	650	100	80	40
	II	96	135	175	80	520	45	60	—
	III	46	70	89	25	350	30	40	—
Biegung $\sigma_{b, zul}$	I	130	180	245	50	750	100	100	40
	II	110	160	220	45	600	45	70	—
	III	65	95	129	30	400	30	55	—

Anmerkung:

In der Fachliteratur gibt es unterschiedliche Angaben über σ_{zul} bzw. Angaben mit unteren und oberen Grenzwerten. Es ist zweckmäßig, die hier angegebenen Werte zu benutzen, um zu einheitlichen Ergebnissen zu gelangen.

Die Unterschiedlichkeit der Angaben beruht auf einer unterschiedlichen Berücksichtigung verschiedener Einflußfaktoren. Berechnungen nach diesen Darstellungen lassen nur grobe Näherungslösungen zu, weil solche besonderen Einflußfaktoren wie Form und Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückes, Art der Kräfteinleitung, Gefügebau des Werkstoffes und vor allem die geforderte Sicherheit hiermit noch nicht genügend berücksichtigt werden können.



102/1
Zugstab mit Bohrung
gleiche Breite, unterschiedlicher
Querschnitt

Lösen Sie folgende Konstruktionsaufgabe!

Nach Bild 102/1 sind die Abmessungen eines Stahlstabes festzulegen, der aus St 37 bestehen muß und der eine Kraft von 14000 N nach Lastfall II zu übertragen hat.

Gegeben:

$$\begin{aligned} F_{\text{vorh}} &= 14000 \text{ N} \\ \sigma_{zB} &= 370 \text{ N/mm}^2 \\ b &= 10 \text{ mm} \\ d &= 15 \text{ mm} \end{aligned}$$

Gesucht:

$$\begin{aligned} A_{\text{erf}} \\ a \\ v_B \end{aligned}$$

Lösung:

Der gefährdete Querschnitt mit A_{erf} ist die schraffierte Fläche.

$$A_{\text{erf}} = \frac{F_{\text{vorh}}}{\sigma_{z, \text{zul}}}$$

$$A_{\text{erf}} = \frac{14000 \text{ N}}{96 \text{ N/mm}^2}$$

$$\underline{\underline{A_{\text{erf}} = 145,8 \text{ mm}^2}}$$

$$a - d = \frac{A_{\text{erf}}}{b}$$

$$a = \frac{A_{\text{erf}}}{b} + d$$

$$a = \frac{145,8 \text{ mm}^2}{10 \text{ mm}} + 15 \text{ mm}$$

$$a = 14,58 \text{ mm} + 15 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{a = 30 \text{ mm (gewählt)}}}$$

$$v_B = \frac{\sigma_{zB}}{\sigma_{\text{vorh}}}$$

$$v_B = \frac{370 \text{ N/mm}^2}{93,3 \text{ N/mm}^2}$$

$$\underline{\underline{v_B \approx 4}}$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{F_{\text{vorh}}}{A_{\text{gewählt}}}$$

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{14000 \text{ N}}{15 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{\text{vorh}} = 93,3 \text{ N/mm}^2}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{\text{vorh}} < \sigma_{z, \text{zul}}}}$$

Überlegungen zur Materialeinsparung führen zu etwa folgender konstruktiver Lösung (Bild 103/1):

Gegeben:

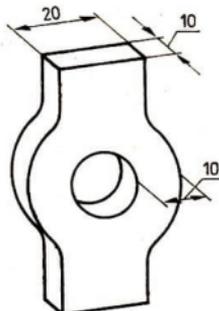
$$\begin{aligned} A_{\text{vorh}} &= 200 \text{ mm}^2 \\ \sigma_{z, \text{zul}} &= 96 \text{ N/mm}^2 \\ F_{\text{vorh}} &= 14000 \text{ N} \\ \sigma_{\text{B}} &= 370 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Gesucht:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{vorh}} \\ \nu_{\text{B}} \end{aligned}$$

Lösung:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{vorh}} &= \frac{F_{\text{vorh}}}{A_{\text{vorh}}} \\ &= \frac{14000 \text{ N}}{200 \text{ mm}^2} \\ \sigma_{\text{vorh}} &= 70 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{\text{vorh}} &< \sigma_{z, \text{zul}} \\ \nu_{\text{B}} &= \frac{\sigma_{\text{B}}}{\sigma_{\text{vorh}}} \\ &= \frac{370 \text{ N/mm}^2}{70 \text{ N/mm}^2} \\ \nu_{\text{B}} &\approx 5,3 \end{aligned}$$



103/1 Zugstab mit Bohrung unterschiedliche Breite, gleicher Querschnitt

das heißt, trotz Materialeinsparung wird eine größere Sicherheit gegen Bruch erreicht (wobei die Fertigung einen größeren Aufwand erfordert).

- Überprüfen Sie, ob die vorgelegte konstruktive Lösung eines nach Lastfall II mit $F = 35000 \text{ N}$ belasteten Ankers (Bild 103/2) aus St 37 die geforderte Sicherheit $\nu = 3,5$ bietet!

Gegeben:

$$\begin{aligned} d &= 24 \text{ mm} \\ F_z &= 35000 \text{ N} \\ \sigma_{z, \text{zul}} &= 96 \text{ N/mm}^2 \\ \nu_{\text{B}} &= 3,5 \end{aligned}$$

Gesucht:

$$\begin{aligned} A_{\text{erf}} \\ \sigma_{\text{vorh}} \\ \nu_{\text{vorh}} \end{aligned}$$

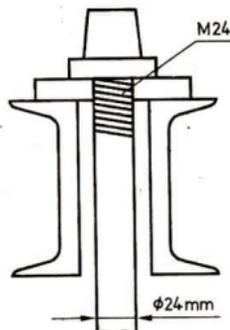
Lösung:

Der gefährdete Querschnitt liegt im Gewindeteil des Ankers. Das Gewinde M 24 hat einen Kernquerschnitt (lt. Tabelle) von $A = 309 \text{ mm}^2$,

$$\begin{aligned} A_{\text{erf}} &= \frac{F_z}{\sigma_{z, \text{zul}}} \\ &= \frac{35000 \text{ N}}{96 \text{ N/mm}^2} \\ A_{\text{erf}} &= 364,6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Bedingung:

$$\begin{aligned} A_{\text{vorh}} &\geq A_{\text{erf}} \\ 309 \text{ mm}^2 &< 364,6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



103/2 Zuganker

Bereits an dieser Stelle der Berechnung ist also vom Konstrukteur ein Fehler gemacht worden. Der Gewindekern hat einen zu kleinen Querschnitt für diese Belastung. Die weitere rechnerische Nachprüfung ergibt:

$$\nu = \frac{\sigma_B}{\sigma_{vorh}}$$

$$\nu = \frac{370 \text{ N/mm}^2}{113 \text{ N/mm}^2}$$

$$\nu = 3,27$$

$$\sigma_{vorh} = \frac{F_z}{A_{vorh}}$$

$$\sigma_{vorh} = \frac{35000 \text{ N}}{309 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{vorh} \approx 113 \text{ N/mm}^2$$

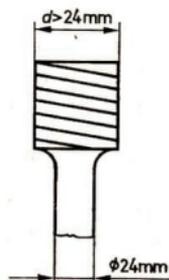
Bedingung:

$$\sigma_{z, zul} \geq \sigma_{vorh}$$

$$96 \text{ N/mm}^2 < 113 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu_{vorh} \geq \nu_{erf}$$

$$3,27 < 3,5$$



104/1 Veränderter Zuganker

Die geforderten Bedingungen sind nicht erfüllt. Schlagen Sie eine Lösung vor, bei der

- die Festigkeitsforderungen erfüllt werden,
- die Festigkeitsforderungen erfüllt und Material eingespart werden kann!

Festigkeit eines Idealkristalls

Im Kristall wirken auf die Kristallbausteine (Atome, Moleküle, Ionen) Kräfte, die sich bei einer bestimmten Lage der Bausteine (zum Beispiel Abstand) im Gleichgewicht befinden. Bei einer gegenseitigen Annäherung (zum Beispiel durch Druck) nimmt die abstoßende Kraft zwischen den Bausteinen zu. Vom Betrag der im Kristall wirkenden Abstoßungskraft bei gegenseitiger Annäherung der Bausteine hängt damit die Widerstandsfähigkeit gegen Zusammendrücken, die Druckfestigkeit und auch die Härte ab. Das gleiche gilt für die Dehnungsbelastung der Kristalle. Auch die Zugfestigkeit und Biegefestigkeit hängen von der dabei auftretenden Anziehungskraft ab. Diese Kräfte lassen sich theoretisch aus den wirkenden Bindungskräften berechnen. Als Beispiel dient folgende Tabelle:

Werkstoff	theoretisch errechnete Festigkeit σ_{zB} in N/mm ²	experimentell ermittelte Festigkeit σ_{zB} in N/mm ²
Aluminium	6000	150
Zink	8400	130
Kupfer	12000	400
Kupfer (Whiskers)	12000	3400
Eisen	21000	290
Eisen (Whiskers)	21000	10000
Stahl	21000	2500
Kochsalz	2500	5

Festigkeit der Realkristalle

Die Tabelle auf S. 104 zeigt, daß zwischen theoretisch errechenbaren und experimentell meßbaren Festigkeitswerten große Unterschiede bestehen. Da sich die Realkristalle der verwendeten Werkstoffe von den Idealkristallen der reinen Festkörpersubstanzen durch ungleichmäßige stoffliche Zusammensetzung und dadurch bedingt durch einen unregelmäßigen Aufbau unterscheiden, lag es nahe, darin die Ursache der Abweichungen zu suchen.

Chemische Zusammensetzung einiger metallischer Werkstofflegierungen

Werkstoff	chemische Zusammensetzung
Massenstahl St 37/M 13	99,73% Fe; 0,15% C; 0,06% P; 0,06% S
Einsatzstahl St 100/16 CrNi 6	96,14% Fe; 0,16% C; 0,2% Si; 0,5% Mn; 1,5% Cr; 1,5% Ni
Messing MS 60	60% Cu; 40% Zn
Bronze RG 8	82% Cu; 8% Si; 7% Zn; 3% Pb
Aluminium Al Si Cu Ni	83,6% Al; 12,5% Si; 0,9% Cu; 1,2% Mg; 0,3% Mn; 1,5% Ni

Infolge der vielfältigen Zusammensetzungsmöglichkeiten der Legierungen bilden sich beim Erstarrungsprozeß Kristalle unterschiedlichster Zusammensetzung, Gitterkonstante und Form. Der Grund für die Verwendung von Metallegierungen anstelle reiner Metalle liegt meist in den Eigenschaften der reinen Metalle beziehungsweise in den Anforderungen, die an einen metallischen Werkstoff gestellt werden.

Reines Eisen ist sehr weich. Zusätze von Kohlenstoff, Mangan, Chrom, Nickel, Vanadium, Wolfram, aber auch von Schwefel und Phosphor sowie Aluminium machen Eisen zu härterem Stahl, der verschleißfest, korrosionsbeständig, gießbar, schweißbar, dehnbar ist: Die Festigkeit eines Werkstoffes ist also nur eine der Eigenschaften, die seine Verwendungsmöglichkeit bestimmt. Solche mechanischen Eigenschaften wie Bruchfestigkeit und Verschleißfestigkeit sind allerdings Eigenschaften eines Werkstoffes, die für die Belastungsfähigkeit und damit für den zu wählenden Querschnitt eines Bauteils und für die Nutzungsdauer von entscheidender Bedeutung sind.

Je geringer der Querschnitt eines Bauteils ist, um so weniger Werkstoff wird benötigt, und um so leichter ist das Bauteil. Leichtere Bauteile in Maschinen und Fahrzeugen erfordern für den Antrieb weniger Energie. Das alles sind ökonomische Probleme, die der Konstrukteur beachten muß, wenn er durch seine Arbeit einen Beitrag leisten will zur Effektivität unserer Industrie und zum Bestehen unserer Erzeugnisse auf dem Weltmarkt. Eine kurzschlüssige, weil einseitig auf die Einsparung an nur einer Stelle orientierte Arbeit eines Konstrukteurs zahlt sich da nicht aus.

■ Das Getriebe des Pkw Trabant hat eine Lebensdauer von etwa 100000 Fahrkilometern. Die Getrieberäder der einzelnen Gänge werden unterschiedlich stark und lange benutzt und demzufolge auch unterschiedlich stark abgenutzt. Bei der Generalüber-

holung des Getriebes müssen aus funktionstechnischen Gründen alle Getrieberäder ausgetauscht werden.

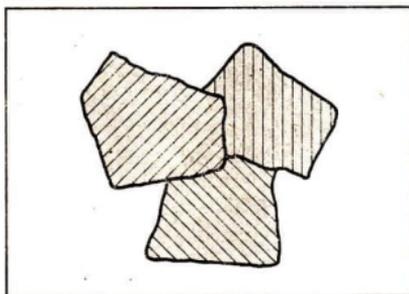
Der Konstrukteur muß deshalb die Getrieberäder so auslegen (konstruieren, zum Beispiel mit unterschiedlicher Zahnradbreite), daß einerseits kein Bruch eines Zahnrades eintritt und andererseits nach etwa 100 000 Fahrkilometern alle Zahnräder möglichst gleichstark verschlissen sind, weil es unökonomisch wäre, wegen nur eines verschlissenen Zahnradpaares das gesamte, ansonsten noch funktionsfähige Getriebe zu erneuern.

Das Getriebe eines Mopeds hat Zahnradpaare, bei denen infolge der Zähnezahlen stets die gleichen Zähne miteinander in Eingriff kommen. Da es bei der Herstellung von Zahnrädern immer einmal geschehen kann, daß einer der Zahnradzähne etwas ungenau ausgeformt oder infolge einer nicht ganz gleichmäßigen Zusammensetzung der Legierung nicht ganz gleichmäßig gehärtet ist, trifft der fehlerhafte Zahn sehr oft auf den gleichen Zahn des Gegenrades, und die Folge davon ist eine ungleichmäßige Abnutzung, so daß dieses Zahnradpaar vorzeitig ausfällt. Getriebeschaden und vorzeitiges Auswechseln aller Getrieberäder ist die Folge; der volkswirtschaftliche Schaden und der persönliche Schaden der Käufer und Schwierigkeiten bei der Ersatzteilbereitstellung sind entsprechend groß. Der Vorteil eines solchen, nicht sehr lange gebrauchsfähigen, um vielleicht 2 mm im Durchmesser geringeren Zahnrades mit dem entsprechend geringeren Materialeinsatz wird durch die Verluste ins Gegenteil verkehrt. Diese beiden Beispiele sollen zeigen, daß der Konstrukteur nicht nur die Aufgabe hat, die Funktion einer zu entwickelnden Maschine zu garantieren durch die Wahl der richtigen Maschinenteile, er muß auch die Werkstoffeigenschaften der zur Auswahl infrage kommenden Werkstoffe genau kennen und die Lebensdauer der Verschleißteile richtig aufeinander abstimmen. Erst dann ist er in der Lage, die Belastungsfähigkeit der Maschinenteile zu bestimmen beziehungsweise mit Hilfe der Werkstoffeigenschaften die günstigsten Abmessungen der Maschinenteile zu errechnen.

Kristallbaufehler

Das Gefüge einer Metallegierung (Bild 106/1) besteht aus unterschiedlich großen und in verschiedene Richtungen gewachsenen Kristallen. Untersucht man solche Kristalle, dann entdeckt man Stellen, die vom normalen Kristallaufbau abweichen. Solche Stellen werden in der Kristallographie als Kristallgitterfehler bezeichnet.

Die Konzentration solcher Gitterfehler im Realkristall ist verhältnismäßig gering gegenüber der Anzahl der am Kristallgitter beteiligten Atome beziehungsweise Ionen. Man kann davon ausgehen, daß ein Realkristall einen nahezu fehlerfreien Kristall darstellt.



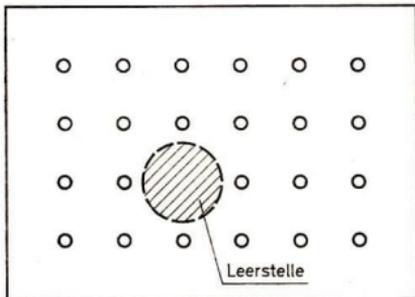
Nulldimensionale Gitterfehler. Solche Fehler treten im Bereich einzelner „Gitterpunkte“ auf. Man bezeichnet sie auch als *Punktfehler*.

Diese Fehler entstehen zum Beispiel dann, wenn im Gitter ein Platz unbesetzt bleibt;

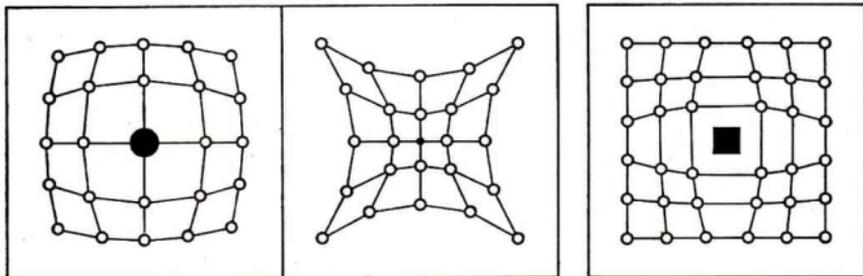
106/1 Gefüge einer Metallegierung mit Kristalliten unterschiedlicher Gitterrichtung

es entsteht eine *Leerstelle* (Bild 107/1). Zu den Punktfehlern rechnet man auch falsch besetzte Gitterplätze. Vor allem *Fremdatome* infolge chemischer Verunreinigungen können solche Fehlstellen verursachen (Bild 107/2). Außerdem kann es vorkommen, daß einzelne Atome zwischen den Gitterplätzen sitzen. Man bezeichnet sie als *Zwischengitteratome* (Bild 107/3). ①

Eindimensionale Gitterfehler. Solche Fehler entstehen im Gitterverband eines Kristalls, wenn sich beim Kristallisieren herausstellt, daß eine einzelne Gitterebene (Bild 107/4) nicht fortgesetzt werden kann. Diese Gitterebene endet dann irgendwo im Kristall und bildet eine Kante, die als *Versetzungslinie* bezeichnet wird.

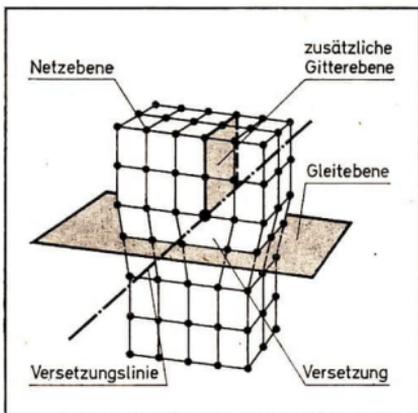


107/1 Punktfehler im Kristallgitter
Leerstelle



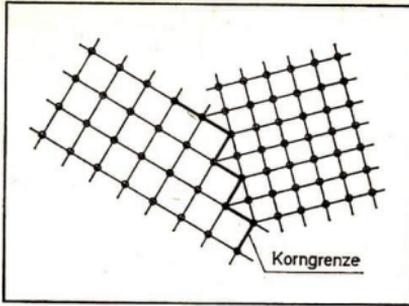
107/2 Punktfehler im Kristallgitter
Fremdatom
größeres bzw. kleineres Fremdatom
im Wirtsgitter

107/3 Punktfehler im Kristallgitter
Fremdatom auf Zwischengitterplatz –
Einlagerungsmischkristall



107/4 Versetzung innerhalb eines kubischen Gitters
Diese Versetzungen entstehen beim Kristallwachstum, wenn sich Netzebenen nicht vollständig ausbilden. Die Kante einer solchen Ebene im Kristall heißt *Versetzungslinie*

① Arbeiten Sie die Erläuterungen zu Frenkel-Defekt und zu Schottky-Defekt durch (021704 – Festkörperphysik, Volk und Wissen Berlin 1977, S. 77)!



Zweidimensionale Gitterfehler. Solche Fehler entstehen durch das Wachsen der Kristallite in einer Metallegierung von vielen einzelnen Kristallkeimen aus. Beim Zusammentreffen der meist unterschiedlich ausgerichteten Kristallgitter der Kristallite entstehen Grenzflächen, die man als *Korngrenzen* (Bild 108/1) bezeichnet.

Diese Korngrenzen können als Gleitebene für die Kristallite beim Einwirken von Verschiebungskräften dienen. Diese Ebenen liegen aber bei Polykristallen nicht alle in Gleitrichtung. Zwischen den Korngrenzen und Versetzungen kommt es zu Behinderungen. Bei grobkörnigen Polykristallen ist ein derartiger Gleitprozeß eher zu erwarten als bei feinkörnigen Werkstoffen. Viele dieser Korngrenzen führen sogar eher zu einer Verfestigung des Werkstoffes als zu einer Erhöhung der Verformbarkeit. ①

Die Korngröße beeinflusst den Widerstand von metallischen Werkstoffen gegenüber einer Verformung. Je kleiner die Kristallite, desto größer sind Festigkeit und Härte einer Metallegierung! ②

7

▼ Führen Sie eine Korngrenzenätzung an einem Stück Kupferblech durch!

Für die Vorbereitung des Bleches gelten die Hinweise der „Arbeitsschutzverordnung für den naturwissenschaftlichen Unterricht“ vom 25. 5. 1967, S. 15.

Zur Ätzung wird eine Lösung von 100 g Ammoniumpersulfat in 1000 cm³ Wasser verwendet. Dieser Lösung werden 50 cm³ einer dreiprozentigen Wasserstoffperoxidlösung zugesetzt. Die Einwirkzeit soll 15 s bis 30 s betragen. Danach wird das Kupferblech mit Wasser abgespült und unter dem Mikroskop betrachtet.

Festigkeit des Werkstoffes und der Form

Wenn eine Maschine, eine Anlage, ein Bauwerk (oder ein Teil davon) gebaut werden soll, dann sind für den Entwurf und die Konstruktion verschiedene Bedingungen als Vorgaben zu beachten. Einige davon wurden schon mehrfach erwähnt. Durch solche Bedingungen können oft einander widersprechende Forderungen entstehen.

- Ein Traktor soll beim Pflügen unter hoher Belastung und bei geringer Geschwindigkeit und zum Straßentransport der geernteten Feldfrüchte bei geringer Belastung und hoher Geschwindigkeit eingesetzt werden.
 - Ein Flugzeug soll aus der Sicht des Passagiers möglichst große Fenster besitzen. Aus der Sicht des Konstrukteurs (aus Festigkeitsgründen) sollte der Flugzeugrumpf möglichst keine Fenster und Türen, zumindest aber nur sehr kleine besitzen.
 - Ein Panzer soll gegen Abwehrmittel durch eine starke Panzerung geschützt sein; er soll aber als geländegängiges Fahrzeug schnell, wendig und leicht sein. ③
- Bei vielen der konstruktiv zu lösenden Aufgaben stehen als Hauptforderungen aus-

reichende mechanische Festigkeit und Einsatz geringer Werkstoffmasse im Vordergrund.

Es sei die Aufgabe gestellt, einen Träger zu konstruieren. Hierfür gibt es die Möglichkeit, auf verschiedenen Wegen die gestellte Aufgabe zu lösen.

Zunächst wird die Belastungsart festgestellt. Sie sei aus den Betriebsbedingungen gegeben und soll als Lastfall III (wechselnde Belastung) angenommen werden.

1. Gegeben: Werkstoff ist vorgeschrieben und damit Festigkeit des Werkstoffes

Gesucht: Querschnittsform und Querschnittsfläche und damit Masse des Werkstoffes

2. Gegeben: Abmessungen und Werkstoff sind vorgeschrieben und damit Belastungsmöglichkeit

Gesucht: Querschnittsform kann gewählt werden und damit Masse des Werkstoffes

3. Gegeben: Abmessungen sind vorgeschrieben und damit Belastungsmöglichkeit

Gesucht: Werkstoff und Querschnittsform können gewählt werden und damit Masse des Werkstoffes.

Wählt der Konstrukteur einen Werkstoff aus, dessen Festigkeit groß und dessen Dichte klein ist, dann kann er unter Verwendung einer Querschnittsform mit möglichst großem Widerstandsmoment (gegen Biegung) einen Träger konstruieren, der äußerst leicht ist.

Die Festigkeitslehre bietet heute Erkenntnisse und Gleichungen an (vgl. Anmerkung auf S. 102), mit denen man den wirklich im Werkstück auftretenden maximalen Spannungen in vielen Sonderfällen rechnerisch sehr nahe kommen kann. Wenn der Konstrukteur mit Sicherheit diese schwierigen Berechnungen beherrscht und wenn ihm nicht durch Vorschriften andere Bedingungen auferlegt werden, dann kann er für die zulässige Spannung im Elastizitätsbereich (Punkt E im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Bild 73/1) den obersten Betrag der Spannung einsetzen.

Dieses Verfahren wird vielfach, zum Beispiel in der Raumfahrt, in der Militärtechnik, aber auch beim Brückenbau und Hochbau u. a. eingesetzt. Dadurch gelangt man zu besonders leichten Bauteilen. Eine solche Bauweise bezeichnet man als **Leichtbauweise**. Dieses Verfahren darf aber nicht bedenkenlos eingesetzt werden. Eine Erprobung solcher Leichtbauteile unter Einsatzbedingungen ist unbedingt erforderlich.

Fragwürdig wird diese Art von Leichtbau dann, wenn man zum Beispiel im Kraftfahrzeugbau dem Trend kapitalistischer Autofirmen folgt, die durch Verwendung äußerst dünner, aber nicht etwa besonders korrosionsbeständiger Karosseriebleche zwar sehr leichte Pkw produzieren, die aber eben auf eine (den Profit steigernde) kurze Lebensdauer der Pkw von nur einigen Jahren berechnet sind. Bei Maschinen, Bauteilen, Geräten und Fahrzeugen, die nur für ganz spezielle Einsatzbedingungen gebaut werden, wendet man bevorzugt die Leichtbauweise an. Flugzeuge, Raketen und Raumfahrzeuge kann man weitgehend in Leichtbauweise fertigen, weil diese Geräte meist

① Arbeiten Sie die Erläuterungen zu Gleitebene und Whyskers durch (021704 Festkörperphysik, Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1977, S. 79 bis 81!

② Bauen Sie aus Baukastenwürfeln unterschiedlicher Größe einen zusammengesetzten Körper als Modell eines aus verschiedenen Kristalliten bestehenden kristallinen Körpers auf, und demonstrieren Sie die Bedeutung der Korngrenzen und der Größe der Kristallite für die Verformbarkeit des kristallinen Stoffes!

③ Stellen Sie andere, in Widerspruch zueinander stehende Bedingungs-paare für Ihnen bekannte Beispiele von Maschinen, Fahrzeugen und Bauteilen auf!

nur ganz bestimmten Belastungen ausgesetzt sind. Demgegenüber muß man bei der Konstruktion eines Reisezugwagens der Eisenbahn viele harte Belastungsfälle berücksichtigen: Stoßbelastung von den Schienen, Zug- und Druckbelastung durch das Aneinanderkoppeln, durch den Zug- und Schubbetrieb, hohe Festigkeit gegen Zusammendrücken bei Zusammenstoßen oder beim Umkippen eines solchen Wagens, Überbelastung durch Überladung des Wagens usw.

Der Verwirklichung der Leichtbauweise stellen sich oft Schwierigkeiten in den Weg:

- Der vorgesehene Werkstoff ist zu teuer oder nicht beschaffbar (Autokarosserie aus goldlegiertem Stahlblech);
- die gewählte Querschnittsform kann nicht im Serienbau eingesetzt werden, weil der Werkstoff in dieser Querschnittsform sich nicht im Lieferangebot befindet. Die Einzelanfertigung wird zu teuer und erfordert zuviel Arbeitszeit;
- bei der gewählten Querschnittsform entsteht zuviel Materialabfall;
- bei der gewählten Querschnittsform (zum Beispiel Träger eines Flugzeugtragflügels) würde das Bauteil (Tragflügel) zu dick, die auftretende Luftwiderstandskraft verursachte einen höheren Energieverbrauch der Flugzeug-Antriebsmaschine.

Werkstoffverbesserung. Ein möglicher Weg zur Lösung der nicht immer einfachen Konstruktionsaufgabe ist der, die Eigenschaften der vorhandenen Werkstoffe noch zu verbessern. Auf S. 104 war bereits erwähnt worden, daß die praktisch erreichten Festigkeitswerte der Werkstoffe weit entfernt sind von den theoretisch errechenbaren Werten.

Untersuchungen und Experimente zur Entwicklung neuer Verfahren der Werkstoffgewinnung — zum Beispiel im nahezu schwerelosen Zustand im Weltraum bei Salut-Forschungen, bei denen gezielt die Kristallisation der Metallegierung hinsichtlich fehlerfreier Kristalle oder hinsichtlich optimaler Einbettung von Gitterfehlern gesteuert wird — können noch Fortschritte bringen.

Werkstoffsubstitution. Ein anderer Weg zum Leichtbau ist der, bei dem neue Werkstoffe geschaffen beziehungsweise bereits entwickelte Werkstoffe als Ersatz für traditionelle Werkstoffe gewählt werden.

Durch die Entdeckung neuer Werkstoffe wurde es in den letzten Jahrzehnten möglich, neue elektronische Bauelemente auf Halbleiterbasis mit einer großen Anzahl von Funktionselementen auf kleinster Fläche (nur wenige Quadratmillimeter) zu entwickeln. Solche mikro-elektronischen Bauelemente ermöglichen die Anwendung vollkommen neuer Prinzipien in der gesamten Steuerungs- und Regelungstechnik und in der maschinellen Datenverarbeitung. Dadurch kann eine Automatisierung bei geringem Materialaufwand und Raumbedarf sowie äußerst geringem Energieverbrauch erreicht werden. Die gesamte Raumfahrt bis hin zur Erforschung der Venus und anderer Sterne wäre zum Beispiel ohne die Halbleitertechnik nicht möglich, genau so wie die Entwicklung und der Einsatz von Industrierobotern. Um die Lebensdauer von Pkw-Karosserien, die sehr wesentlich von der Korrosionsgeschwindigkeit abhängt, zu erhöhen, müßte man stärkeres Stahlblech einsetzen. Ein stärkeres Stahlblech rostet nicht so schnell durch wie ein dünneres, aber solch eine Karosserie wird dadurch wieder sehr viel schwerer und teurer. Der Einsatz besser legierter Stahlbleche oder auch anderweitig korrosionsgeschützter (Rostschutzfarbe, Zinkschicht) oder korrosionsbeständigerer Werkstoffe bis hin zum Einsatz von Plastikwerkstoffen bietet eine Möglichkeit, die Lebensdauer dieser Teile zu erhöhen.

Die Werkstoffprüfung

Die mechanischen Eigenschaften von Festkörpern, zum Beispiel aus Metallegierungen, wie sie als Werkstoffe Verwendung finden, werden zahlenmäßig angegeben, damit sie bei Konstruktionsberechnungen rechnerisch berücksichtigt werden können. Die Ermittlung dieser Zahlenwerte erfolgt mit *Prüfmaschinen*. Wesentliche Prüfverfahren sind die

statische Festigkeitsprüfung

bei ruhender oder langsam zunehmender Belastung, das heißt, es erfolgt keine stoßweise, wechselnde oder eine Dauerbelastung.

statische Härteprüfung

bei gleichbleibender Belastung.

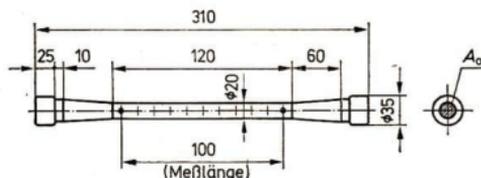
Statische Festigkeitsprüfung. Um die Bruchfestigkeit bei Zugbelastung eines Werkstoffes zu bestimmen, setzt man einen Probestab aus dem zu prüfenden Werkstoff einer meßbaren Belastung aus. Der Zugversuch ist das wichtigste und international anerkannte Prüfverfahren, weil er

- wissenschaftliche Zahlenwerte liefert, die als Berechnungsgrundlage verwendbar sind,
- an einem bestimmten Werkstoffquerschnitt ermittelte Festigkeitswerte liefert, die allgemeingültig sind, also auf andere Querschnitte und Werkstücklängen übertragbar sind.

Der Probestab (Bild 111/1) hat kreisförmigen, quadratischen oder rechteckigen Querschnitt A_0 und eine Meßlänge l_0 . Die sogenannte *Versuchslänge* l_v ist

$$l_v = l_0 + d.$$

Der kurze Normalstab hat folgende festgelegte Abmessungen:



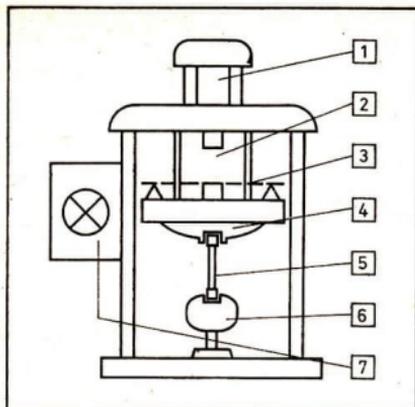
Durchmesser	$d_0 = 20 \text{ mm}$
Querschnitt	$A_0 = 314 \text{ mm}^2$
Meßlänge	$l_0 = 5 d$
	$l_0 = 100 \text{ mm.}$

111/1 Probestab

Die zum Zerreißen eines solchen Stabes erforderliche Zugkraft für St 70 beträgt etwa 220000 N.

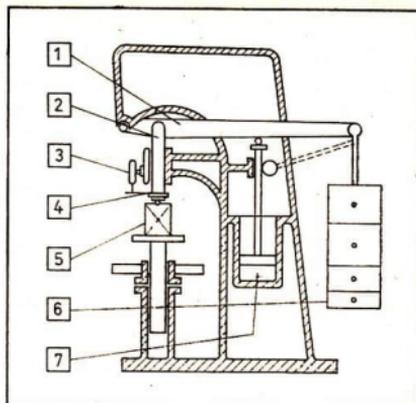
Die **Prüfmaschine** (Bild 112/1) arbeitet meist nach dem Prinzip der hydraulischen Presse. Universalprüfmaschinen gestatten die Einspannung von Probestäben für die Durchführung von Zugversuchen und von Druckversuchen und von Biegeversuchen. Die Meßvorrichtung (mit Schleppzeiger) zeigt die jeweilige Belastung und die Bruchbelastung sowie die Dehnung des Probestabes an. ①

① Beschreiben Sie eine Prüfmaschine nach Aufbau und Funktion anhand entsprechender Fachliteratur bzw. nach Exkursion in ein Werkstoff-Prüflabor!



112/1 Prüfmaschine für Zug, Druck und Biegung

- 1 – Druckzylinder
- 2 – Druckvorrichtung
- 3 – Biegevorrichtung
- 4 – obere Spannvorrichtung
- 5 – Probestab für Zugbelastung
- 6 – untere Spannvorrichtung
- 7 – Anzeigevorrichtung



112/2 Brinell-Härteprüfung Prüfmaschine (Schema)

- 1 – Druckhebel
- 2 – Druckstempel
- 3 – Feinmeßzeiger für Eindringtiefe
- 4 – Druckkugeleinsatz
- 5 – Probekörper
- 6 – auswechselbare Gewichtsstücke zum Einstellen der Druckbelastung
- 7 – Hydraulikzylinder zum Einstellen der Vorbelastung

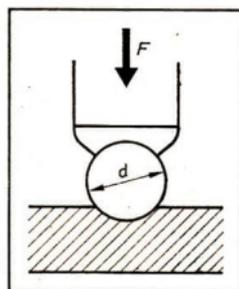
Statische Härteprüfung. Die Härte eines Werkstoffes ist der Widerstand, den er dem Eindringen eines anderen Körpers bestimmter Härte in seine Oberfläche entgegensetzt. Bei vielen Werkstoffen besteht eine betragsmäßige Beziehung zwischen der Zugfestigkeit, der Dehnung und der Härte. Die Härte ist gleichzeitig ein Maß für die Verschleißfestigkeit und die mechanische Bearbeitbarkeit (Zerspanen, Schleifen).

Bei der Härteprüfung wird meist das Eindringverfahren angewendet. Ein *Prüfkörper*, der härter als der Werkstoff des Prüfstückes ist, wird dabei in die Werkstückoberfläche eingedrückt. Aus der Abmessung des mit einem Mikroskop meßbaren verursachten Eindruckes und der Belastung wird ein Härtewert ermittelt.

Brinell-Härteprüfung nennt man ein Verfahren, bei dem eine gehärtete Stahlkugel von zum Beispiel 10 mm Durchmesser mit einer festgelegten Kraft F in die Werkstückoberfläche eingedrückt wird (Bild 112/2). Die Eindrückkraft ist entsprechend dem zu prüfenden Werkstoff zu wählen:

Stahl, Grauguß	30 000 N
Messing, Bronze,	
Al-Legierungen	10 000 N
Aluminium	2 500 N
Blei, Holz	1 250 N

112/3
Brinell-Härteprüfung
Kugleindrückverfahren
(Schema)



Die Brinellhärte wird als sogenannte Härtezahl gekennzeichnet. Diese Härtezahl HB wird errechnet

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

Dabei ist F die Eindrückkraft (in N) und A die Kalottenfläche des Kugeleindrucks (in mm^2).

Bei einem Kugeldurchmesser von 10 mm wurde bei einer Prüfbelastung von 30000 N eine Eindrückfläche von 15 mm^2 ermittelt.

Wie groß ist die Brinellhärte des Werkstoffes ?

Gegeben:

$$F = 30000 \text{ N}$$

$$A = 15 \text{ mm}^2$$

Lösung:

$$HB = \frac{F}{A} \quad HB = \frac{30000 \text{ N}}{15 \text{ mm}^2} \quad \underline{\underline{HB = 2000 \text{ N/mm}^2}}$$

Gesucht:

HB

Zwischen der Brinellhärte und der Bruchfestigkeit eines Werkstoffes bestehen Beziehungen, die eine angenäherte Bestimmung der Festigkeit aus der Brinellhärte (und auch umgekehrt) zulassen.

$$\sigma_{zB} = c \cdot HB$$

Der Umrechnungsfaktor c ist in Tabellen festgehalten. Die Umrechnung gibt nur grobe Näherungswerte.

Werkstoff	c
Kohlenstoff-Stahl	0,36
Grauguß	$\frac{HB - 40}{6}$
Kupfer	0,40
Magnesium-Legierung (Elektron)	0,40
Aluminium, gegossen	0,26

Zur Härtmessung bedient man sich, vor allem in der Werkstatt, auch anderer, leicht handhabbarer Verfahren und entsprechender Geräte. Sie führen zu anderen Zahlenwerten und dürfen deshalb nicht mit der Brinellhärte verglichen oder gar gleichgesetzt werden. Jedes Verfahren wie zum Beispiel Rollhärteprüfung, Rockwell-Härteprüfung, Vickers-Härteprüfung, Fallhärteprüfung, Schlaghärteprüfung, Rücksprunghärteprüfung, ergibt andere Härtezahlenwerte; sie sind deshalb nur bei ein und demselben angewendeten Verfahren miteinander vergleichbar.

Hinweis: Die in der Literatur oft noch anzutreffenden Angaben in kg/mm^2 sind unter

Beachtung des SI umzurechnen in die Einheit N/mm^2

$$\left(\text{Multiplikation mit dem Faktor } f \approx 10 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}} \right).$$

Gegeben:

$$HB_{\text{alt}} = 200 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$f \approx 10 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}} - 2$$

Lösung:

$$HB_{\text{SI}} \approx f \cdot HB_{\text{alt}}$$

$$HB_{\text{SI}} \approx \frac{10 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot 200 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}}$$

$$\underline{\underline{HB_{\text{SI}} \approx 2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}}}$$

1. Generatoren und Motoren

Im Bericht des Zentralkomitees der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands an den X. Parteitag der SED sagte Erich Honecker: „Die Fonds an Energie und Rohstoffen, über die unser Land verfügt, bleiben gleich oder wachsen nur wenig. Diesen Gegebenheiten ist Rechnung zu tragen, und zwar auf sehr lange Sicht. Wir erhöhen mit großer Konsequenz das eigene Aufkommen unseres Landes an Roh- und Brennstoffen, die Sekundärrohstoffe eingeschlossen. Trotzdem reichte das nicht aus, ein hohes Wirtschaftswachstum zu gewährleisten, würde nicht zugleich die Material- und Energieökonomie auf allen Gebieten entscheidend gesteigert. Das ist die Hauptsache.“

Um Energie sparsam und rationell einsetzen zu können, muß man wissen, welch hohen Veredlungsgrad die elektrische Energie auszeichnet, wie aufwendig die verlustarme Übertragung der Elektroenergie ist und welche Prozesse der Wandlung der elektrischen Energie in andere Energiearten zugrunde liegen. Es gehört zu den Aufgaben des folgenden Kapitels dieses Buches, das Wissen um diese Zusammenhänge zu schaffen und zu vertiefen, damit künftige Facharbeiter in allen Bereichen unserer Volkswirtschaft aktiv am Kampf um geringsten Material- und Energieeinsatz teilnehmen können.

Die Bereitstellung der Elektroenergie für unsere hochentwickelte Volkswirtschaft erfordert in den Kraftwerken **Generatoren**, die den Bedarf jederzeit decken können.

Ein erheblicher Teil der Elektroenergie wird zum Antrieb von **Motoren** verwendet, die ihrerseits Arbeitsmaschinen im Haushalt (z. B. Küchenmaschinen), in der Industrie (z. B. Drehmaschinen), in der Landwirtschaft (z. B. Transportbänder) und an vielen anderen Stellen antreiben. So unterschiedlich die Energiewandlungen in Motoren und Generatoren (rotierenden elektrischen Maschinen) auch sind, gemeinsam ist ihnen als Wirkungsprinzip die Induktion und die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes (Bild 114/1).

	<i>Generator</i>	<i>Motor</i>
<i>Unterschied</i>	<i>Wandlung</i> W_{mech} in W_{el}	<i>Wandlung</i> W_{el} in W_{mech}
<i>Gemeinsamkeit</i>	<i>Nutzung der Induktion</i>	

114/1 Einteilung elektrischer Maschinen

Generatoren

Physikalische Grundlagen. Allen Generatoren ist gemeinsam, daß sie elektrische Energie nur liefern, wenn ihnen mechanische Energie zugeführt wird. Jedem Radfahrer ist das schon in unangenehmer Weise deutlich geworden; denn er mußte beim Fahren mit eingeschaltetem Dynamo (Generator) zur Beleuchtung des Fahrrads erheblich mehr Kraft aufwenden als bei Fahrten ohne Beleuchtung. Genau so verhält es sich bei den Generatoren der Kraftwerke, den Lichtmaschinen der Kraftfahrzeuge oder den Generatoren auf Schiffen, die die an Bord vorhandenen elektrischen Anlagen versorgen. Auch für elektrische Maschinen gilt das **Gesetz von der Erhaltung der Energie:** Energie kann weder aus dem Nichts gewonnen werden, noch verlorengehen, sie kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Der Mittler für die Energieumwandlung am Generator ist das magnetische Feld eines Dauermagneten oder einer stromdurchflossenen Spule. Das Wirkprinzip ist die **Induktion**. Das **Induktionsgesetz** besagt: Jede Änderung des von einer Spule umschlossenen Magnetfeldes führt zur Induktion einer Spannung in der Spule. Aus dem Physikunterricht ist bekannt, daß diese Änderung entweder durch die Bewegung einer Spule im Bereich eines Magnetfeldes oder durch die Bewegung eines Magnetfeldes im Bereich einer Spule hervorgerufen werden kann. Beide Möglichkeiten werden bei Generatoren genutzt. ①

Zum Verständnis der Energieumwandlungen am Generator ist die Kenntnis des **Lenzchen Gesetzes** unerlässlich: Der Induktionsstrom ist immer so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Ursache der Induktion entgegenwirkt. Diese Gesetzmäßigkeit ist die Anwendung des Energieerhaltungssatzes auf elektrische Maschinen. ②

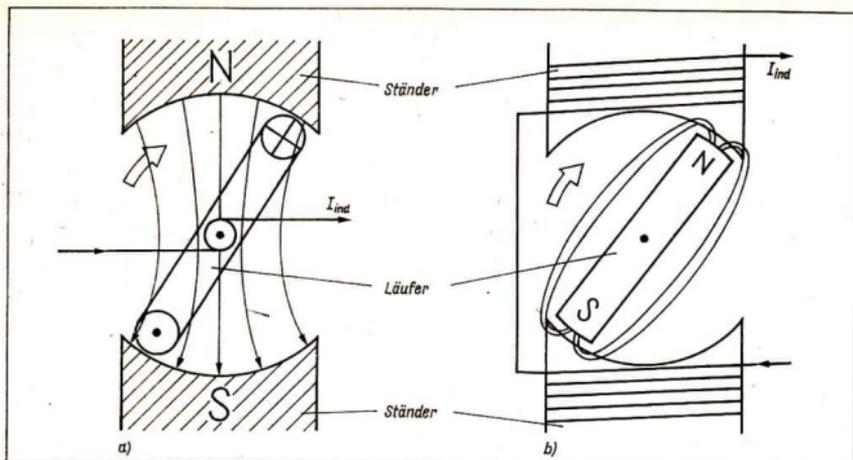
Die Ursache der vom Generator induzierten elektrischen Spannung und des von ihr hervorgerufenen elektrischen Stromes ist die dem Generator zugeführte mechanische Energie. Wenn der durch die Induktion hervorgerufene elektrische Strom der Ursache entgegenwirkt, so wirkt er hemmend auf die von der mechanischen Energie verursachte Bewegung. Diese Tatsache ist im Physikunterricht an einem Versuch dargestellt worden: Stößt man einen Magneten in einen bifilar aufgehängten Ring aus Aluminium hinein, so weicht der Ring der Bewegung aus; zieht man den Magneten aus dem Ring heraus, folgt der Ring der Bewegung.

Daraus wird ersichtlich, daß die Ursache für diese Erscheinung der Strom ist, der im Ring von der Induktionsspannung angetrieben wird. Seine Richtung bestimmt die Richtung des Magnetfeldes um den Ring, das im Fall a gegenüber dem verursachenden, bewegten Feld eine Abstoßung, im Fall b eine Anziehung bewirkt.

In beiden Fällen wird also die Bewegung des verursachenden Feldes gehemmt, entweder durch die abstoßende oder durch die anziehende Wirkung des induzierten Magnetfeldes. Um dieses Bremsen der Bewegung zu überwinden, muß mechanische Energie aufgewendet werden. Am Generator ist das die Energie, die ihm zugeführt werden muß, damit er elektrische Energie liefern kann.

Aufbau von Generatoren. Generatoren sind rotierende elektrische Maschinen, d. h., die mechanische Energie wird ihnen in Form der Bewegungsenergie des gedrehten Rotors (Rotationsenergie) zugeführt. Sie müssen deshalb prinzipiell aus zwei Hauptteilen bestehen, dem umlaufenden, rotierenden **Läufer** oder **Rotor** und dem feststehenden, den Rotor tragenden **Ständer** oder **Stator**. Befindet sich das Magnetfeld (Erregerfeld) außen im Stator, dann bezeichnet man den Generator als **Außenpolma-**

-
- ① Informieren Sie sich im Lehrbuch Physik Kl. 9 über das Induktionsgesetz!
Wovon ist die Höhe der Induktionsspannung bei der Relativbewegung zwischen einer Spule und einem Magnetfeld abhängig?
Informieren Sie sich dazu im Lehrbuch Physik Kl. 9!
- ② Informieren Sie sich im Lehrbuch Physik Kl. 9 über die Aussage des Lenzchen Gesetzes!



116/1 Ausführungsformen technischer Generatoren

a) Außenpolmaschine, b) Innenpolmaschine

schine (Bild 116/1a), bei ihm rotiert die Induktionsspule. Bei Innenpolmaschinen (Bild 116/1b) rotiert das Magnetfeld im Innern des Generators, die Induktionsspule dagegen befindet sich im Stator.

Das Magnetfeld wird von Dauermagneten bereitgestellt (Generatoren kleinster Leistung, z. B. Fahrraddynamo) oder durch Elektromagnete erzeugt, die mit Gleichstrom gespeist werden. Der Gleichstrom wird entweder einem Gleichstromnetz entnommen, aus dem Wechselstromnetz durch Gleichrichtung gewonnen oder von einem Gleichstromgenerator geliefert, der direkt mit der Welle des Wechselstromgenerators verbunden ist. Der letzten Art der Bereitstellung des Gleichstroms gibt man bei großen Generatoren den Vorzug.

Der Gleichstrom zur Erzeugung des Erregerfeldes wird bei Innenpolmaschinen über Schleifkontakte (Bürsten) dem Rotor zugeführt, die induzierte Spannung wird an den feststehenden Spulen des Ständers abgegriffen. Bei Außenpolmaschinen wird das erregende Magnetfeld an den Ständerspulen erzeugt, die induzierte Spannung über Schleifkontakte am Rotor abgegriffen. Bei Generatoren kleiner Leistung bis zu einigen Kilowatt ist es für die Bürstenabnutzung unerheblich, ob der Erregerstrom oder der durch die Induktion verursachte Strom über die Schleifkontakte geführt wird.

Bei größeren Generatoren gibt man der Innenpolmaschine den Vorzug; denn es ist technisch schwer realisierbar, die elektrische Energie bei Spannungen bis 10 kV und Stromstärken von einigen Tausend Ampere von einer rotierenden Spule abzunehmen. Die Schleifkontakte wären durch die hohe Strombelastung schnell verbraucht und würden am Übergang Schleifring-Bürste erhebliche Verluste elektrischer Energie verursachen. Deshalb führt man dem Rotor die viel geringere elektrische Energie zur Erzeugung des Magnetfeldes bei niedriger Spannung und beherrschbaren Stromstärken zu und greift die erzeugte elektrische Energie an der feststehenden Spule ab. ①

Wechselstromgeneratoren

Wirkprinzip. Wechselstromgeneratoren erzeugen Strom, bei dem sich Spannung und Stromstärke zeitlich periodisch nach Betrag und Richtung ändern.

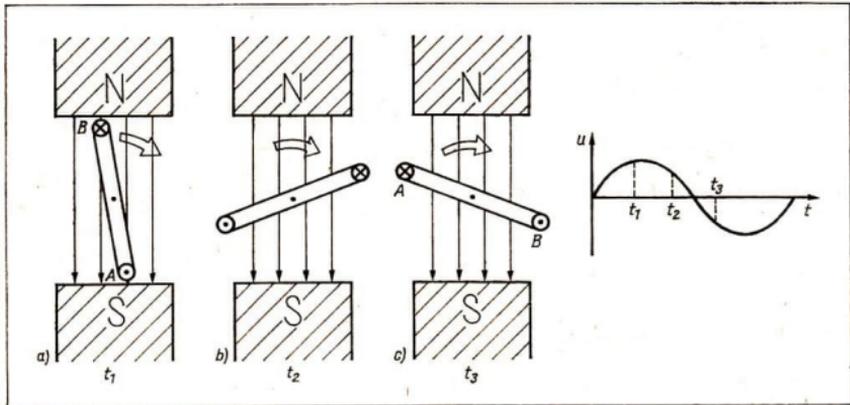
1

Um die Wirkungsweise und die Eigenschaften eines Wechselstromgenerators kennenzulernen, wird ein Modellgenerator nach PSV 9, V 3.1.1. aufgebaut und die von ihm produzierte Spannung untersucht.

Der Versuch 1 zeigt, daß bei der Rotation einer Spule (Leiterschleife) im Bereich eines Magnetfeldes in der Spule eine Wechselspannung induziert wird. Im Versuch ist das am Meßgerät zu erkennen.

Da die Leiterschleife nur eine sehr geringe Spannung liefert, wird sie durch eine Spule auf einem Eisenkern, den Doppel-T-Anker, ersetzt. Der oszillographische Nachweis der induzierten Spannung ergibt angenähert das Bild einer Wechselspannungskurve (PSV 9, Abb. 4.1.4./2).

Bild 117/1 zeigt, wie diese Wechselspannung entsteht. Bei der Bewegung der Leiterschleife im Magnetfeld verändern sich Anzahl und Richtung der von der Leiterschleife umschlossenen Feldlinien. Dem entsprechen Betrag und Richtung der induzierten Spannung. Die induzierte Spannung ist dann am größten, wenn sich die Anzahl der von der Leiterschleife umschlossenen Feldlinien am stärksten ändert (Bild 117/1 a).



117/1 Entstehung einer Wechselspannung

Nach einer Drehung um 90° (Bild 117/1 b) ändert sich die Anzahl der umschlossenen Feldlinien nur gering, die induzierte Spannung geht gegen Null. Beim Weiterdrehen (Bild 117/1 c) ändert sich die Polarität der Spannung und die Richtung des von ihr verursachten Stromes. Jeder Stellung der Leiterschleife zum Magnetfeld entspricht also ein bestimmter Wert der Wechselspannung, ein Momentanwert.

Die punktweise Aufnahme der einzelnen Spannungswerte, die nur grafisch erfolgen kann, führt zur Sinuskurve der Wechselspannung.

- ① Dem Rotor eines Generators wird viel weniger elektrische Energie zugeführt als den Induktionsspulen entnommen werden kann.
Wie wird die Energiedifferenz ausgeglichen?

Technische Ausführung und Eigenschaften von Wechselstromgeneratoren

Wechselstromgeneratoren werden als Innen- und Außenpolmaschinen gebaut.

2
▼ Untersuchen Sie im folgenden Versuch Innen- und Außenpolmaschinen!

Geräte

Generator-Motor-Modell, Meßgerät, Glühlampe, Glimmlampe, Experimentiermotor.

Vorbereitung des Versuchs

Befestigen Sie am Generator-Motor-Modell die geblättern Eisenkerne und die Spulen mit 1200 Windungen!

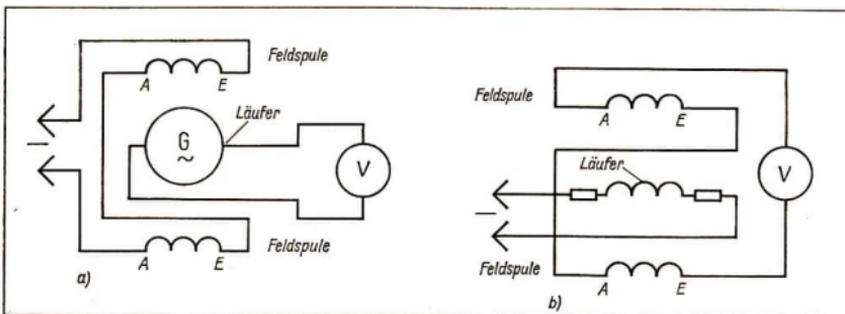
Schalten Sie den Generator zunächst nach Bild 118/1 a und im zweiten Teil nach Schaltplan b!

Durchführung des Versuchs

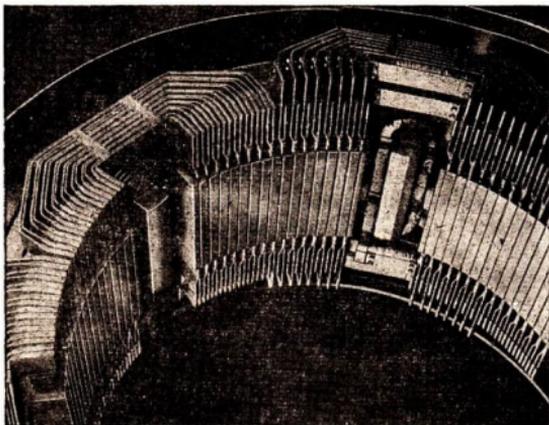
Treiben Sie den Generator mit dem Experimentiermotor an!

Messen Sie die Spannung an der Außenpolmaschine!

Schalten Sie den Generator als Innenpolmaschine, und messen Sie die Spannung! Als Meßgerät eignet sich ein Vielfachmeßgerät Uni 7 oder Uni 10 im Meßbereich 50 V Wechselspannung.



118/1 Schaltpläne a) Außenpolmaschine, b) Innenpolmaschine



118/2
Ständer einer elektrischen
Maschine

Auswertung des Versuchs

Beschreiben Sie den Unterschied zwischen Außen- und Innenpolmaschine hinsichtlich der Schaltung!

Beschreiben Sie den Unterschied der beiden Maschinen bezüglich der induzierten Spannung!

Beschreiben Sie die Aufgabe der Bürsten bei der Innen- und der Außenpolmaschine!

Versuch 2 bestätigt die Darlegungen über Innen- und Außenpolmaschinen und zeigt außerdem, daß bei Innenpolmaschinen die induzierte Spannung höher ist als bei Außenpolmaschinen. Das kommt den Anforderungen an Kraftwerksgeneratoren entgegen. Zwischen den Modellgeneratoren der Versuche 1 und 2 und Großgeneratoren besteht ein erheblicher Unterschied in der Ausführung der Induktionsspulen. Im Gegensatz zu den Modellgeneratoren verteilen sich bei Großgeneratoren die Spulen auf den gesamten Umfang des Ständers (Bild 118/2).

Wechselstromgeneratoren werden in der Technik vorwiegend für Sonderanwendungen genutzt. Auch der Fahrraddynamo ist ein solcher Generator. ①

Wird der Rotor eines Fahrraddynamos allmählich in immer schnellere Umdrehung gebracht, dann wird am Aufleuchten der Lampe des Fahrrads erkennbar, daß die elektrische Leistung des Dynamos von der Drehzahl abhängt.

Größe und Frequenz der induzierten Wechselspannung. Bei allen Wechselstromgeneratoren gilt für die induzierte Wechselspannung

$$U_q = \Phi \cdot c \cdot n \quad (1)$$

In dieser Gleichung bedeuten:

U_q : Quellenspannung des Generators,

Φ : Magnetischer Fluß durch die Induktionsspulen (Stärke des von der Spule umschlossenen Magnetfeldes),

c : Für bestimmte Maschinen spezifische Konstante, in der solche Größen wie Luftspaltfläche, Leiterlänge und Spulendurchmesser berücksichtigt sind,

n : Relative Drehzahl zwischen Magnetfeld und Spule.

Aus der Gleichung (1) kann man ableiten, daß die induzierte Spannung auf zwei Wegen geändert werden kann.

1. Eine Erhöhung des magnetischen Flusses führt zu einer Vergrößerung der induzierten Spannung. Da bei technischen Generatoren das Magnetfeld von Elektromagneten erzeugt wird, ist der magnetische Fluß über den Erregerstrom beeinflussbar.

2. Eine Vergrößerung der Drehzahl hat eine Erhöhung der Induktionsspannung zur Folge.

Durch die Drehzahl des Generators ist aber auch die Frequenz des erzeugten Wechselstroms festgelegt. Da die Frequenz des zu erzeugenden Wechselstroms im allgemeinen konstant gehalten werden muß, bleibt für die Steuerung der Induktion als beeinflussbare Größe nur die Stärke des Erregerstroms für das magnetische Feld.

① Demontieren Sie vorsichtig einen Fahrraddynamo!

Verwenden Sie möglichst einen defekten, denn Sie werden ihn nicht wieder zusammenbauen können! Entscheiden Sie, ob es sich um eine Innen- oder Außenpolmaschine handelt! Wieviele Induktionsspulen enthält der Dynamo? Welche Aufgaben erfüllen die Blechkäfige? Welche Besonderheiten finden Sie am Erregermagneten? Warum wird die induzierte Spannung über nur eine Leitung abgegriffen? Versehen Sie ein Stück Karton mit einem Loch von der Größe des Erregermagneten, stecken Sie den Magneten bis zur Mitte durch das Loch, und stellen Sie das Magnetfeld mit Hilfe von Eisenfeilspänen dar! Unterhalten Sie sich mit Ihrem AG-Leiter über Ihre Untersuchungsergebnisse!

Die Abhängigkeit der Stärke und der Frequenz des Wechselstroms von der Drehzahl läßt sich im Versuch 3 sehr gut beobachten. Bei niedrigen Drehzahlen des Dynamos leuchtet die Lampe nur schwach und am Oszillographen sind weniger Perioden der Wechselspannung zu beobachten als bei höherer Drehzahl.

Die Frequenz des Wechselstroms ist außer von der Drehzahl des Generators auch von der Anzahl p der Polpaare des Magnetfeldes abhängig. Meistens haben die Generatoren mehrere Polpaare. Das erreicht man durch Aufteilung und räumliche Versetzung der Spulen des Elektromagneten.

Für die Frequenz des Wechselstroms gilt die Beziehung

$$f = n \cdot p \quad (2) \quad \textcircled{1}$$

Durch eine Erhöhung der Polpaarzahl kann man also bei vorgegebener Frequenz die Drehzahl des Rotors im Generator und damit die Radialkraft, die bei der großen Masse des Läufers recht erheblich ist, verringern.

Eine Rechnung verdeutlicht die Umfangsgeschwindigkeit, die von den Läufern großer Generatoren erreicht werden. Schon bei nur 0,80 m Läuferdurchmesser und einer Drehzahl von 3000 min^{-1} tritt eine Umfangsgeschwindigkeit von 126 m/s auf, das entspricht 453,6 km/h.

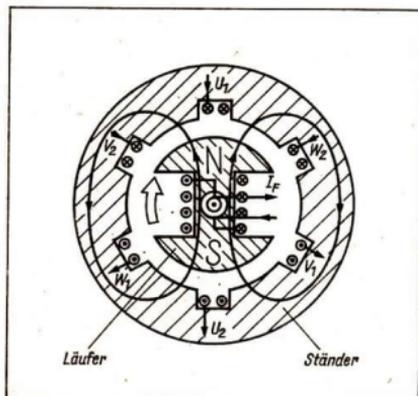
Drehstromgeneratoren. In den Kraftwerken werden überwiegend Drehstromgeneratoren eingesetzt. Sie arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Wechselstromgeneratoren, ihr Ständer enthält jedoch drei Induktionsspulen, in denen je eine Wechselspannung induziert wird.

Beim Drehstromgenerator sind die drei Induktionsspulen um einen Winkel von jeweils 120° versetzt (Bild 120/1).

Infolge der Versetzung der Spulen werden die Maximalwerte der drei Wechselspannungen zeitlich nacheinander induziert. Da einer Umdrehung des Magnetfeldes eine Periode der induzierten Wechselspannung entspricht, sind die drei Wechselspannungen um $1/3$ Periode zeitlich gegeneinander verschoben. Den Strom in einem System von drei Wechselspannungen bezeichnet man als Dreiphasenwechselstrom oder kurz Drehstrom.

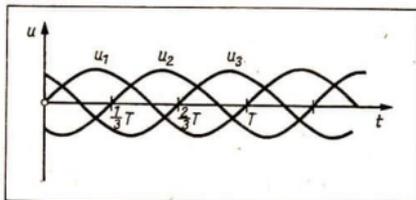
Die graphische Darstellung der drei Wechselspannungen zeigt Bild 120/2.

Drehstrom bietet gegenüber Wechselstrom Vorteile beim Transport der Elektroenergie und bei der Nutzung der Elektroenergie zum Antrieb leistungsfähiger, unkomplizierter und robuster Elektromotoren.



120/1 Drehstromgenerator (Prinzip)

120/2 Liniendiagramm des Drehstroms



Gleichstromgeneratoren

Wirkprinzip. Gleichstromgeneratoren sind unentbehrlich als Erregermaschinen für Drehstromgeneratoren, als Schweißgeneratoren, als Generatoren für Schiffsnetze oder als Lichtmaschinen in Kraftfahrzeugen. Wie bei Wechselstromgeneratoren wird auch bei Gleichstromgeneratoren in den Induktionsspulen eine Wechselspannung erzeugt. Durch konstruktive Maßnahmen erreicht man, daß diese Wechselspannung nicht sinusförmig, sondern schon weitgehend gleichförmig ist (Bild 122/1). Die Gleichrichtung der induzierten Wechselspannung erfolgt bei der Stromabnahme über die Schleifkontakte.

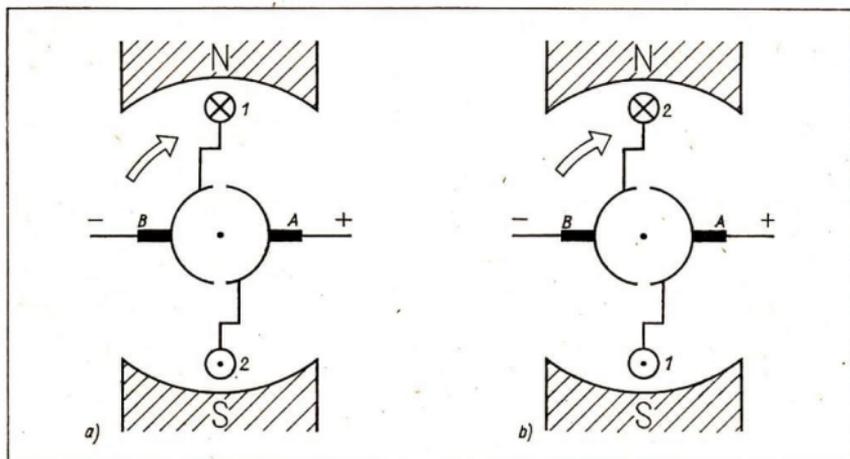
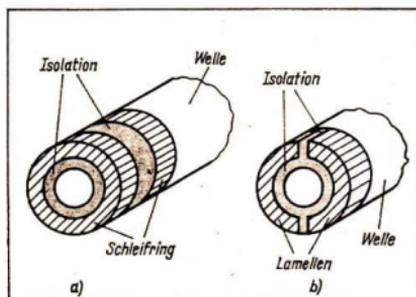
Gleichstromgeneratoren sind Außenpolmaschinen.

Während bei Wechselstrom-Außenpolmaschinen die im Läufer induzierte Wechsel-

121/1

Schleifring und Kommutator an Wechselstrom- und Gleichstrommaschinen

- a) Wechselstrommaschine
b) Gleichstrommaschine



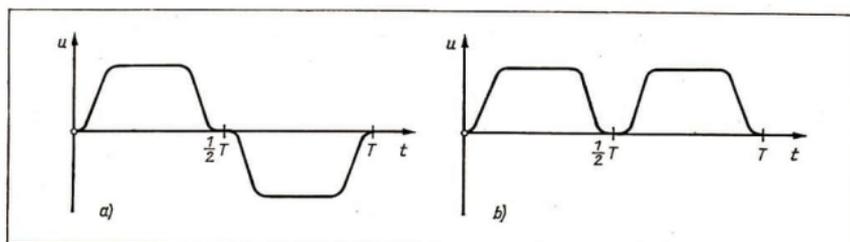
121/2 Prinzip des zweipoligen Gleichstromgenerators

- ① Welche Drehzahl muß ein 48-poliger Läufer eines Turbogenerators haben, damit die induzierte Wechselspannung die Frequenz 50 Hz hat?
Hinweis: In der Technik werden Drehzahlen in min^{-1} angegeben.

spannung über zwei axial gegeneinander isolierte Schleifringe abgegriffen wird (Bild 121/1 a), benötigt der Gleichstromgenerator einen geteilten Schleifring, dessen zwei Lamellen radial gegeneinander isoliert sind (Bild 121/1 b). Wie im Bild 121/2 im Prinzip gezeigt, rotiert zwischen den Polen eines Magneten eine Leiterschleife oder Spule. Entsprechend der Darstellung im Teil a fließt der von der induzierten Spannung verursachte Strom in der Leiterhälfte 1, die am Nordpol des Magneten vorbeiläuft, in die Bildebene hinein, in der Leiterhälfte 2 fließt der Strom aus der Bildebene heraus.

Demgemäß hat Bürste A positive, Bürste B dagegen negative Polarität. In der Skizze b hat sich die Leiterschleife um 180° gedreht, Leiterhälfte 1 passiert jetzt den Südpol, Leiterhälfte 2 den Nordpol. Die Stromrichtung in der Leiterschleife hat sich geändert, bei 1 fließt der Strom aus der Bildebene heraus, bei 2 in die Bildebene hinein. An den Bürsten herrscht jedoch die gleiche Polarität wie vorher, denn durch die Teilung des Schleifrings hat Bürste A auch jetzt wieder positive, Bürste B negative Polarität.

Nach jeweils einer halben Umdrehung werden an den Bürsten die Enden der Leiterschleife vertauscht. Während in der Leiterschleife nach wie vor ein Wechselstrom fließt, steht an den Bürsten Gleichspannung zur Verfügung.



122/1 Spannungsverlauf an Leiterschleife und Bürsten

a) Leiterschleife, b) Bürsten

Der Übergang der Bürsten von einer Schleifringhälfte auf die andere erfolgt, wenn die in der Leiterschleife induzierte Spannung Null ist und der Strom seine Richtung wechselt. Das ist der Fall, wenn die von der Leiterschleife umschlossene Fläche senkrecht zu den Feldlinien steht. Daraus folgt, daß bei Gleichstromgeneratoren die Bürsten nicht wie bei Wechselstromgeneratoren in beliebiger Stellung zum Magnetfeld angeordnet werden können, sondern stets senkrecht zu den Feldlinien stehen müssen. Nur unter dieser Bedingung bewirkt der geteilte Schleifring, den man auch Stromwender oder Kommutator nennt, die Gleichrichtung des Wechselstromes (Bild 122/1).

Mit der Versuchsanordnung des Versuches 2, Teil 2, läßt sich auch Gleichstrom erzeugen, indem die Bürsten statt an die beiden ungeteilten Schleifringe an den Kommutator angeschlossen werden. Die Spannungsform wird durch einen Oszillographen nachgewiesen, dessen Vertikalablenkung parallel zu der vom Generator gespeisten Glühlampe geschaltet wird.

Der vom Generator gelieferte Gleichstrom ändert zwar seine Richtung nicht, doch seine Momentanwerte schwanken zwischen Null und einem Höchstwert. Derartigen Gleichstrom nennt man pulsierenden Gleichstrom.

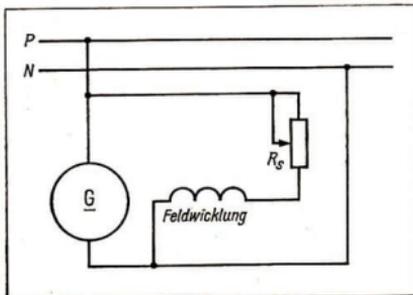
Damit die Welligkeit dieses Gleichstroms verringert wird, teilt man die Induktionsspule des Generators in eine größere Anzahl von Spulen auf, deren Enden mit einander gegenüberliegenden Lamellen des Kommutators verbunden werden. Einen vielteiligen Kommutator nennt man einen **Kollektor**.

Technische Ausführung von Gleichstromgeneratoren

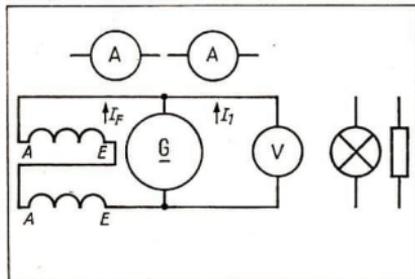
Gleichstrom-Nebenschlußgeneratoren. Die Lichtmaschinen vieler Kraftfahrzeuge sind Gleichstromgeneratoren. Allerdings wird bei ihnen das erregende Feld nicht wie im Versuch 1 von einem Dauermagneten bereitgestellt, sondern von einem Elektromagneten erzeugt.

Lichtmaschinen sind Nebenschlußgeneratoren, d. h., die Erregerspulen sind parallel zur Läuferwicklung geschaltet (Bild 123/1). Solche Maschinen erregen sich selbst. Zur Erzeugung des Magnetfeldes im Ständer, des Erregerfeldes, braucht ihnen von außen kein Strom zugeführt zu werden. Das Material für den Kern der Erregerspulen wird bei diesen Generatoren so gewählt, daß in ihm immer ein geringer Restmagnetismus zurückbleibt.

Der Restmagnetismus genügt, im Läufer eine geringe Spannung zu induzieren, die einen schwachen Strom durch die Feldspulen treibt. Durch diesen Strom verstärkt sich das Erregerfeld und in der Folge die induzierte Spannung.



123/1 Schaltplan eines Gleichstrom-Nebenschlußgenerators



123/2 Schaltplan eines Nebenschlußgenerators

Diese wechselseitige Verstärkung von Erregerfeld und Induktionsspannung führt schließlich dazu, daß der Generator seine Nennspannung erreicht.

5
▼ Untersuchen Sie die Eigenschaften eines Nebenschlußgenerators im nachfolgenden Versuch!

Geräte

Generator-Motor-Modell (Spulen mit 1200 Windungen), Strommesser, Glühlampe, Spannungsmesser, Widerstand (etwa 15 Ω), Experimentiermotor.

Vorbereitung des Versuchs

Das Generator-Modell wird mit geblättern Eisenkernen, den Spulen mit 1200 Windungen und dem Doppel-T-Anker ausgerüstet. Die Schaltung erfolgt nach Bild 123/2.

Vor der Benutzung des Modells als Generator wird es kurze Zeit an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, damit die Spulenkern magnetisiert werden. Die Polarität braucht dabei nicht beachtet zu werden. Die Drehrichtung des Antriebsmotors muß mit der des als Motor geschalteten Generators übereinstimmen.

Durchführung des Versuchs

Das Generator-Modell wird zunächst langsam gedreht und die Spannung an den Bürsten gemessen. Nach dem Vergrößern der Drehzahl wird der Spannungsmesser durch eine Glühlampe ersetzt. Im zweiten Teil des Versuchs wird der Generator mit einem Widerstand von etwa 15 Ω belastet.

und die Stromstärke am Widerstand und an den Feldspulen gemessen. Zum Abschluß der Arbeit mit dem Nebenschlußgenerator werden die Anschlüsse der Feldspulen an den Bürsten vertauscht, an die Bürsten wird ein Spannungsmesser angeschlossen.

Auswertung des Versuchs

Die Versuchsauswertung muß auf folgende Fragen eine Antwort geben:

Warum mußten die Spulenkern magnetisiert werden?

Welche Spannungen liefert der Generator belastet und unbelastet?

Welche Abhängigkeit besteht zwischen Drehzahl und abgegebener Spannung?

Wie verhalten sich Feld- und Arbeitsstromstärke zueinander?

Was geschah, als die Erregerspulen an den Bürsten umgepolrt wurden?

Versuch 5 läßt einige besondere Eigenschaften des Nebenschlußgenerators erkennen. Die Nennspannung erreicht der Nebenschlußgenerator auch ohne Belastung im sog. Leerlauf.

Wird der Rotor des Generators unter Belastung in langsame Umdrehung versetzt, dann erreicht er die volle Leistung erst nach einer bestimmten Zeit. In dieser Zeit verstärken sich Erregerfeld und induzierte Spannung wechselseitig. Der Strom, der dabei für die Felderregung dem Läufer entnommen wird, ist nur ein Bruchteil des im Läufer verursachten Gesamtstromes.

Bei Großgeneratoren liegt der Anteil etwa bei 4% bis 10% des Gesamtstromes.

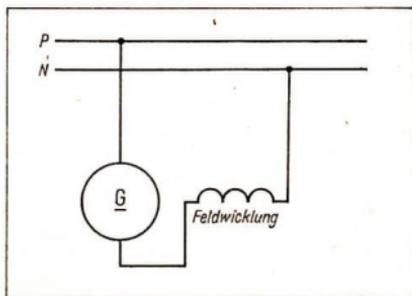
Bei der Zusammenschaltung der Läufer- und Feldwicklung von Nebenschlußgeneratoren muß die richtige Zuordnung der Spulenanfänge und -enden entsprechend dem Drehsinn des Generators beachtet werden. Da die Richtung des Magnetfeldes von der Richtung des Stromflusses durch die Spule des Elektromagneten abhängt, kann bei falscher Stromrichtung durch die Erregerspule deren Restmagnetismus aufgehoben werden. Ohne Restmagnetismus findet jedoch keine Selbsterregung statt, und der Generator liefert keinen Strom.

Um die Leistung des Generators in den zulässigen Grenzen regeln zu können, wird in Reihe zur Feldwicklung ein veränderlicher Widerstand, ein Stellwiderstand, geschaltet (Bild 123/1). In Kraftfahrzeugen übernimmt der Lichtmaschinen-Regler diese Funktion. Er sorgt dafür, daß die Magnetfeldstärke bei den starken Drehzahl- und Belastungsänderungen im Fahrbetrieb annähernd konstant bleibt. ①

Die Gleichstromlichtmaschine der Kraftfahrzeuge wird heute immer stärker von Drehstromlichtmaschinen verdrängt, die betriebssicherer und leistungsfähiger sind.

Gleichstrom-Reihenschlußgeneratoren. Gleichstrom-Reihenschlußgeneratoren sind selbsterregte Generatoren, deren Läufer- und Erregerwicklung in Reihe geschaltet sind (Bild 124/1).

Der Reihenschlußgenerator liefert im Leerlauf (ohne Belastung) auch bei voller Drehzahl nur eine geringe Spannung, die durch den Restmagnetismus hervorgerufen wird.



124/1
Schaltplan eines
Gleichstrom-Reihenschlußgenerators

Da Läufer- und Feldwicklung in Reihe liegen, fließt durch beide ohne äußere Belastung kein Strom. Die Selbsterregung bleibt deshalb auf den Restmagnetismus beschränkt. Eine Verstärkung des Erregerfeldes kommt erst nach dem Schließen des äußeren Stromkreises über einen Lastwiderstand zustande. Das bedeutet aber auch, daß die erzeugte Spannung stark von der Belastung abhängig ist. Diese Eigenschaften machen den Generator nur für bestimmte Sonderanwendungen interessant, wie z. B. für die Energieversorgung von Scheinwerfern, die den Generator über längere Zeit konstant belasten.

Zusammenfassung

Generatoren wandeln mechanische Energie in elektrische Energie um. Infolge der Drehbewegung wird durch die elektromagnetische Induktion in den Generatoren grundsätzlich nur Wechselstrom erzeugt. Mit Hilfe von Kommutatoren kann der Wechselstrom gleichgerichtet werden; solche Generatoren liefern dann Gleichstrom.

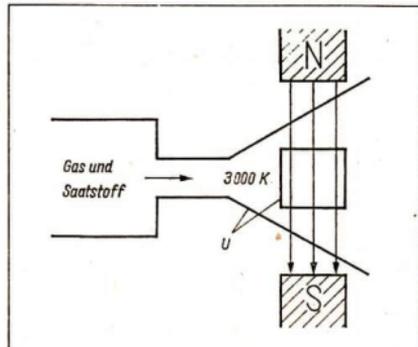
Möglichkeiten zukünftiger Gewinnung von Elektroenergie

Gegenwärtig wird Elektroenergie weltweit vorwiegend in Wärme- und Wasserkraftwerken erzeugt. Zwar arbeiten auch heute schon in vielen Ländern Kernkraftwerke, doch ihr Anteil an der gesamten Erzeugung von Elektroenergie ist noch gering. Der ständige Abbau der Vorräte an Kohle, Erdöl und Erdgas zwingt aber dazu, in absehbarer Zeit die Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung elektrischer Energie weiter auszubauen.

In der DDR wird in den Fünfjahrplänen vorgesehen, den Anteil der Kernkraftwerke an der Erzeugung elektrischer Energie kontinuierlich zu erhöhen.

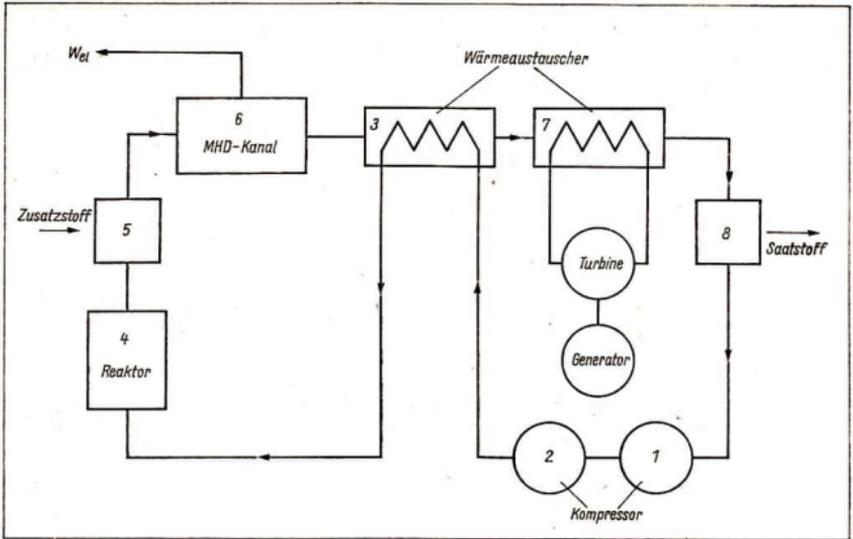
MHD-Generatoren. Sie gehören zu den erfolversprechenden künftigen Lieferanten elektrischer Energie.

Das Wirkungsprinzip ist bei magnetohydrodynamischen Generatoren wie bei anderen Generatoren die Induktion. Anstelle einer Spule bewegen sich mit Ladungsträgern angereicherte aufgeheizte Gase zwischen den Polen eines Magnetfeldes. Durch das Magnetfeld werden die Ladungsträger zu den Elektroden abgelenkt und rufen dort eine Induktionsspannung hervor. Von den Elektroden kann die Spannung abgegriffen und einem äußeren Stromkreis zugeführt werden (Bild 125/1).



125/1 Prinzip des MHD-Generators

- ① Welche Aufgaben hat die Lichtmaschine eines Kraftfahrzeuges zu erfüllen? Warum müssen an eine Lichtmaschine hohe Forderungen hinsichtlich der Konstanz der Spannung gestellt werden?



126/1 Prinzip eines Kraftwerks mit MHD-Generator

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1 u. 2 Kompressoren | 5 Mischer |
| 3 u. 7 Wärmeaustauscher | 6 MHD-Kanal |
| 4 Kernreaktor | 8 Rückgewinnung Alkalimetalle |

Bei der Realisierung der MDH-Generatoren ergeben sich einige Probleme, die bis heute nicht zufriedenstellend gelöst sind. Hohe Wirkungsgrade sind beim MHD-Generator durch sehr hoch erwärmte Gase erreichbar. Bei Temperaturen über 3000 K sind jedoch die dem Ladungsträgertransport dienenden Gase chemisch sehr aggressiv gegenüber dem Leiter- und Isoliermaterial. Eine weitere Schwierigkeit bereitet die Erzeugung des starken Magnetfeldes zur Ablenkung der Ladungsträger. Eine mögliche Ausführung eines Kraftwerkes mit MHD-Generator zeigt Bild 126/1. Ein Gas wird hoch komprimiert (1 und 2), vorgewärmt (3) einem Kernreaktor (4) zugeführt und dort aufgeheizt. Nach Zusatz eines sog. Saatstoffes (Alkalimetalle) zur Anreicherung mit Ladungsträgern (5) passiert es den MDH-Kanal (6), induziert die Spannung, gibt einen Teil seiner Wärme an das Gas vor dem Reaktor ab (3) und wird nach weiterer Abkühlung in einem Wärmeaustauscher (7) und nach Rückgewinnung der Alkalimetalle (8) dem Kreisprozeß wieder zugeführt oder beim offenen Prozeß durch den Schornstein ins Freie geleitet. Die im Wärmeaustauscher (7) dem Gas entzogene Wärme wird zum Antrieb von Turboaggregaten genutzt, die die für Kompressoren und andere Maschinen notwendige elektrische Energie liefern.

Solargeneratoren. Sie stellen keine Alternative zu herkömmlichen Kraftwerken dar. Solargeneratoren bestehen aus sehr vielen teils parallel, teils in Reihe geschalteten, lichtempfindlichen Halbleiterbauelementen. Sie wandeln die Strahlungsenergie der Sonne direkt in elektrische Energie um. Die Anwendung von Solargeneratoren ist auf der Erde nur in Sonderfällen für Verbraucher kleiner Leistungen ökonomisch sinnvoll.

Motoren

Physikalische Grundlagen. Motoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um. Das ist bei batteriebetriebenen Kassettenrekordern deutlich erkennbar, denn nach einer gewissen Spieldauer hat vor allem der Antriebsmotor des Bandes die in den Batterien gespeicherte Elektroenergie verbraucht. Die elektrische Energie der Batterien wurde in Bewegungsenergie des Laufwerkes und des Bandes umgewandelt. Physikalisch erklärt wird diese Erscheinung durch das **elektromotorische Prinzip**: ①

Auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld wirken Kräfte. Da der Richtungssinn der Kräfte, die auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld wirken, von der Stromrichtung abhängig ist, muß ein mit Gleichstrom betriebener Motor einen Kommutator oder Kollektor besitzen. Entsprechend der Darstellung im Bild 127/1 wird die Stromrichtung in der Leiterschleife immer dann umgekehrt, wenn die von der Leiterschleife umschlossene Fläche senkrecht zu den Feldlinien steht. Diese Umkehr hat zur Folge, daß der Richtungssinn der Kraft auf die Leiterschleife konstant bleibt und die Leiterschleife ihre Drehrichtung beibehält.

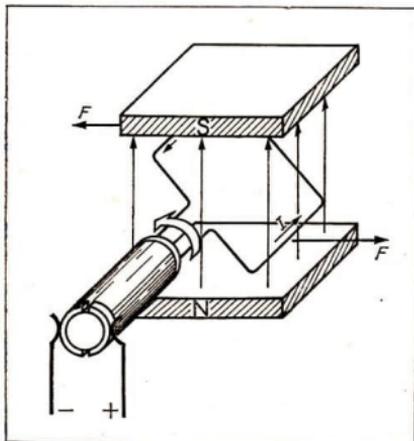
Das trifft auch für Wechselstrom-Kommutatormotoren zu, wie später noch gezeigt wird.

In jedem Motor laufen bei der Umwandlung der elektrischen in mechanische Energie auch generatorische Vorgänge ab. Ein Versuch und seine Auswertung sollen das zeigen.

An einem Spielzeugmotor, Motor aus dem Baukasten Elektronik o. ä. wird bei konstanter Betriebsspannung die Stromaufnahme gemessen und die Belastung durch unterschiedlich starkes Abbremsen der Welle oder Antriebsscheibe variiert.

Der Versuch 6 zeigt, daß sich die Stromaufnahme des Motors in Abhängigkeit von der Belastung ändert, sie ist der Belastung proportional.

Diese Beobachtung steht scheinbar im Widerspruch zum Ohmschen Gesetz, das ja bekanntlich sagt, daß die Stromstärke bei konstantem Widerstand der Spannung proportional ist. Da im Versuch die Spannung nicht geändert wurde und auch der Widerstand des Läufers durch die Länge und den Querschnitt des Spulendrahtes festliegt, dürfte sich die Stromstärke im Läufer nicht ändern. Diese Überlegungen lassen aber unberücksichtigt, daß auch beim Motor im Läufer eine Spannung induziert wird, denn der Läufer ist eine rotierende Spule im Magnetfeld. Diese Spannung ist der angelegten Spannung entgegengerichtet. ②



127/1

Wirkungsweise des Kommutators
am Gleichstrommotor

- ① Informieren Sie sich im Lehrbuch Physik Kl. 9 auf den Seiten 92 bis 95 über das elektromotorische Prinzip und die Wirkungsweise des Gleichstrommotors!
- ② Geben Sie den Grund dafür an, daß die im Läufer eines Motors induzierte Gegenspannung der Klemmenspannung entgegengerichtet ist!

Im Moment des Anlaufens ist die Gegenspannung Null, sie behindert den Stromfluß durch die Spule nicht. Die Folge ist eine sehr hohe Stromaufnahme des Motors im Anlauf, die bei vielen Motoren eine Begrenzung des Anlaufstromes erfordert. Sobald der Motor läuft, begrenzt die vom Läufer induzierte Gegenspannung mit steigender Drehzahl den Läuferstrom immer mehr, bis sich bei unbelastetem Motor ein Gleichgewicht zwischen der Klemmenspannung am Läufer und der Gegenspannung eingestellt hat. Wird nun der Läufer durch Belastung an seiner Welle abgebremst, dann verringert sich seine Drehzahl und damit die Gegenspannung; der Läufer vermag die wegen der Belastung erforderliche größere Kraft durch eine höhere Stromaufnahme aufzubringen.

Bei Verringerung der Belastung steigt die Drehzahl an, die Gegenspannung erhöht sich und die Stromaufnahme des Motors wird geringer.

Elektrische und mechanische Leistung, Wirkungsgrad. Elektromotoren müssen die zum Antrieb von Maschinen erforderliche Leistung aufbringen. Die Leistungsabgabe des Motors wird durch die Aufnahme von Elektroenergie ermöglicht, deren Leistung von der angelegten Spannung und der Stromaufnahme des Motors bestimmt wird. In den technischen Daten der Elektro-Schlagbohrmaschine ESB 16/2 heißt es u. a.:

Nennspannung	220 V	Leistungsaufnahme	550 W
Nennstromstärke	2,6 A	Leistungsabgabe	310 W

Aus der Nennspannung und der Nennstromstärke errechnet man die Leistungsaufnahme des Motors mit

$$P = U \cdot I \quad (3)$$

zu 572 VA. Diese Leistung ist die Scheinleistung der Maschine, die mit Wechselstrom betrieben wird. Aus dieser Scheinleistung und der mit Leistungsmessern meßbaren Wirkleistung läßt sich der Leistungsfaktor des Motors berechnen.

$$\cos \varphi = \frac{P_w}{P_s} \quad (4); \quad \cos \varphi = \frac{550 \text{ W}}{572 \text{ VA}}; \quad \underline{\underline{\cos \varphi = 0,96}}$$

Das ist ein sehr guter Leistungsfaktor, der beweist, daß sich die Motorenbauer bei der Konstruktion des Motors bemüht haben, die Blindleistung, die Wechselstromnetze ohne jeden Nutzeffekt belastet, so klein wie möglich zu halten.

Aus den Angaben des Datenblattes läßt sich auch der Wirkungsgrad des Motors berechnen. Da der Wirkungsgrad der Quotient aus abgegebener Leistung und aufgenommener Leistung ist, ergibt sich für die Bohrmaschine:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (5); \quad \eta = \frac{310 \text{ W}}{550 \text{ W}}; \quad \underline{\underline{\eta = 0,56}}$$

In Prozent $\eta = 56\%$

44% der elektrischen Energie gehen beim Betrieb mit der Nennleistung der Nutzung durch Umwandlung in Wärme verloren.

Diese Verluste entstehen in den Wicklungen des Motors durch die Wärmewirkung des Stromes, in den Eisenkernen durch Wirbelströme und durch die Reibung.

Dem günstigen Leistungsfaktor des Motors steht also ein weniger guter Wirkungsgrad gegenüber, der u. a. auch von dem in der Bohrmaschine vorhandenen Getriebe wesentlich beeinflußt wird. Während die Leistungsaufnahme des Elektromotors über Spannungs-, Stromstärke- und Leistungsmessungen bestimmbar ist, muß die Leistungsabgabe mechanisch an der Welle des Motors gemessen werden.

Drehmoment, Drehwinkel, Winkelgeschwindigkeit. Die Ermittlung der Leistungsabgabe eines Motors oder der Leistungsaufnahme einer Maschine setzt die Kenntnis

des Drehmoments voraus. Die mechanische Leistung einer Kraft F über den Weg s in der Zeit t wird nach der Gleichung

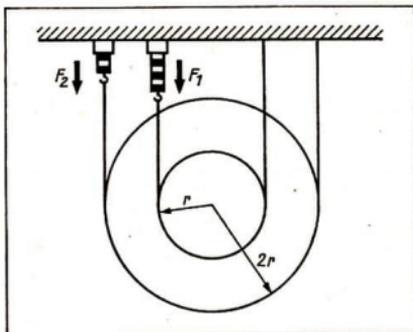
$$P = \frac{F \cdot s}{t} \quad (6)$$

berechnet.

Bei der Drehbewegung wirkt diese Kraft aber nicht über einen geradlinigen Weg, sondern am Umfang einer Welle oder Antriebscheibe. Zur Kennzeichnung der Drehwirkung auf die Achse oder Antriebscheibe wird die physikalische Größe Drehmoment benutzt.

Zur Bestimmung des Drehmoments wird ein Motor mit zwei Antriebscheiben, deren Durchmesser sich wie 1:2 verhalten, benutzt.

Die Kraftwirkung des Motors an den Antriebscheiben wird mit Federkraftmessern gemessen, die einen Faden um die Antriebscheiben etwas vorspannen (Bild 129/1). Es wird vorausgesetzt, daß der Motor während des Versuchs mit gleicher Spannung betrieben wird und demzufolge eine konstante Leistung zeigt. Wird die Kraft an der kleinen Antriebscheibe gemessen, ergibt sich der doppelte Wert gegenüber der Messung an der großen Scheibe.



129/1

Kraftmesser zur Bestimmung des Drehmoments

Werden die Messungen am gleichen Motor mit weiteren unterschiedlichen Antriebscheiben wiederholt, ergibt sich immer wieder das gleiche Produkt aus Kraft und Abstand der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt. Dieses Produkt bezeichnet man als das

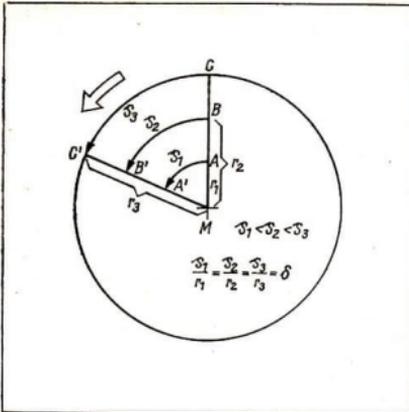
Drehmoment M .

Das Drehmoment ist das Produkt der Kraft und des senkrechten Abstandes der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt.

$$M = F \cdot r \quad (7)$$

Außer dem Drehmoment werden zur Kennzeichnung von Drehbewegungen zwei weitere Größen gebraucht, der Drehwinkel σ und die Winkelgeschwindigkeit ω . Auf einer im Punkt M gelagerten Kreisscheibe (Bild 130/1) sind auf einem Radius die Punkte A, B und C markiert. Dreht sich die Scheibe, dann legen die Punkte in Abhängigkeit vom Abstand zum Drehpunkt unterschiedliche Wege zurück. Gemeinsam ist den drei Punkten, daß sie bei jeder beliebigen Drehung den gleichen Winkel überstreichen. ①

- ① Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen der Winkel- und der Bahngeschwindigkeit klemmen Sie eine Zeitung in die Speichen des Vorderrades Ihres Fahrrads oder Mopeds! Versetzen Sie das Rad in schnelle Umdrehung! Sie können zwar die Buchstaben in der Nähe der Nabe noch lesen, je näher die Zeichen aber dem Umfang des Rades sind, desto schlechter sind sie zu erkennen. Wie erklären Sie sich das, da Sie doch wissen, daß das Rad an allen Stellen die gleiche Winkelgeschwindigkeit hat?



Es liegt daher nahe, diesen Winkel zur Kennzeichnung von Drehbewegungen zu nutzen. Es gilt die Definition:

Der Drehwinkel ist der Quotient aus dem Weg s , den ein Punkt auf einer Kreisbahn mit dem Radius r zurücklegt, und dem Radius r der Kreisbahn.

$$\sigma = \frac{s}{r} \quad (8)$$

Einheit ist $1 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ rad}$ (Radiant), $1 \text{ rad} = 57,3^\circ$

Der Drehwinkel wird meistens im Bogenmaß angegeben. Er ist eine Verhältniszahl. Einer Drehung um 360° entspricht der Drehwinkel $\sigma = 2\pi$, denn bei einer vollen Umdrehung legt ein Punkt auf der Kreisbahn den Umfang des Kreises zurück. Der Drehwinkel berechnet sich dann zu

$$\sigma = \frac{2\pi \cdot r}{r}$$

Wird bei einer Drehbewegung die Zeit berücksichtigt, dann erhält man die Winkelgeschwindigkeit. Unter der Voraussetzung, daß die Drehbewegung gleichförmig ist, d. h., daß die Anzahl der Umläufe in der Zeiteinheit konstant ist, gilt:

Die Winkelgeschwindigkeit ist der Quotient aus dem Drehwinkel σ und der Zeit t der Bewegung.

$$\omega = \frac{\sigma}{t} \quad (9)$$

Bei Drehbewegungen ist es üblich, an Stelle der Zeit die Drehzahl n zu verwenden. Die Drehzahl kann aus der Anzahl der Umläufe innerhalb einer bestimmten Zeit ermittelt werden.

$$n = \frac{\text{Anzahl der Umläufe}}{t}$$

Sie läßt sich auch aus der Umlaufzeit T für einen Umlauf berechnen:

$$n = \frac{1}{T} \quad (10)$$

Die Drehzahl gibt die Anzahl der Umläufe (Umdrehungen) in der Zeiteinheit (s^{-1} oder min^{-1}) an.

Mit $\sigma = 2\pi$ für einen Umlauf wird bei n Umläufen aus Gleichung (9):

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (11)$$

Gleichung (6) kann jetzt auf Drehbewegungen zugeschnitten werden. Die Kraft F wirkt bei der Drehung am Umfang der getriebenen oder treibenden Welle oder Scheibe bei einer Umdrehung über den Weg $2 \cdot \pi \cdot r$. Dieser Weg muß mit der Anzahl der Umdrehungen multipliziert werden, da die Leistung in der Zeit t bei mehr als nur einer Umdrehung gebracht wird. Aus (6) wird

$$P = 2\pi \cdot r \cdot F \cdot n$$

In dieser Gleichung sind (7) und (11) enthalten. Unter Verwendung dieser Beziehungen und unter der Voraussetzung, daß M und n konstant sind, vereinfacht sie sich mit (7) zu

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (12)$$

und mit Gleichung (11) zu

$$P = M \cdot \omega \quad (13)$$

Für die Arbeit bei der Drehbewegung gilt mit

$$W = P \cdot t \quad (14)$$

und mit (9) und (13) durch Einsetzen in (14)

$$W = M \cdot \sigma \quad (15)$$

Damit die Orientierung bei den Größen der geradlinigen und der Drehbewegung leichter fällt, sind in Bild 131/1 noch einmal die wichtigsten Größen der geradlinig gleichförmigen Bewegung und der gleichförmigen Drehbewegung gegenübergestellt.

gleichförmige Bewegung	
geradlinig	rotierend
Weg s	Drehwinkel σ
Geschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$	Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\sigma}{t}$
Kraft F	Drehmoment $M = F \cdot r$
Arbeit $W = F \cdot s$	Arbeit $W = M \cdot \sigma$
Leistung $P = \frac{F \cdot s}{t}$ $P = F \cdot v$	Leistung $P = \frac{M \cdot \sigma}{t}$ $P = M \cdot \omega$

131/1

Größen der geradlinig gleichförmigen Bewegung und der gleichförmigen Drehbewegung

8

▼ Bestimmen Sie die Leistung eines Motors im folgenden Versuch!

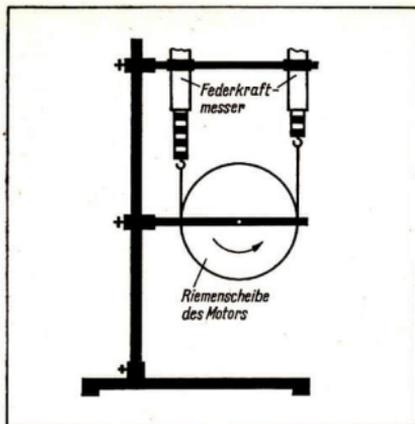
Geräte

Gleichstrommotor mit Schnurscheibe (Motor aus Baukasten „Elektronik V“), Federkraftmesser, Einrichtung zur Drehzahlmessung, Stoppuhr, Spannungsmesser, Strommesser, Stativmaterial, Spannungsquelle.

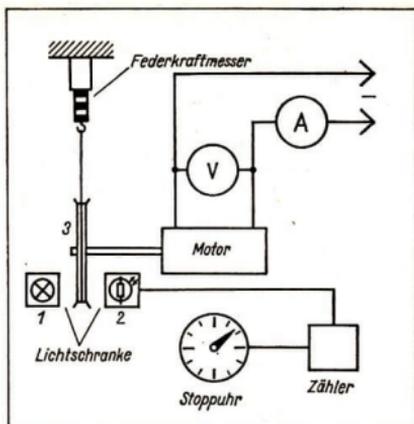
Vorbereitung des Versuchs

An dem Motor müssen die aufgenommene elektrische Leistung und die abgegebene mechanische Leistung ermittelt werden. Die elektrische Leistung ist über Spannungs- und Strommessungen leicht zu bestimmen. Zur Feststellung der mechanischen Leistung müssen gemessen werden:

1. Die am Umfang der Schnurscheibe wirkende Kraft,



132/1 Kraftmessung am Motor



132/2

Prinzip der Messung der mechanischen Leistung

1 — Lichtsender 2 — Lichtempfänger
3 — Antriebscheibe des Motors

2. der Abstand der Wirkungslinie der Kraft vom Mittelpunkt der Antriebswelle,
3. die Drehzahl des Motors.

Zur Messung der Kraft bauen Sie eine Anordnung auf, wie sie aus Bild 132/1 ersichtlich ist. Die beiden Kraftmesser werden etwas vorgespannt, damit die Reibung zwischen Faden und Schnurscheibe ausreichend groß wird.

Der Abstand der Wirkungslinie der Kraft vom Mittelpunkt der Schnurscheibe wird mit einem Meßschieber gemessen.

Die Drehzahl des Motors muß leistungslos bestimmt werden. Sofern die Schule einen Digitalzähler mit Drehzahlmeßeinrichtung über eine Lichtschranke besitzt, ist die Drehzahlmessung leicht durchführbar, wenn Sie die Schnurscheibe mit einem Loch versehen und mit dessen Hilfe den Lichtstrahl der Lichtschranke unterbrechen. Steht kein Zähler mit Lichtschranke zur Verfügung, sollten Sie den Versuch langfristig vorbereiten, indem Sie die Mitglieder einer Arbeitsgemeinschaft Elektronik oder BMSR-Technik bitten, ihrer Arbeitsgemeinschaft einen elektronischen Drehzahlmesser mit Lichtschranke zu leihen oder zu bauen.

Zur Ermittlung der Drehzahl brauchen Sie außerdem eine Stoppuhr. Sofern Ihnen die Demonstrations-Stoppuhr zur Verfügung steht, wird diese mit dem Zählgerät gekoppelt und Zeitmessung und Zählung der Umläufe erfolgen koordiniert.

Durchführung des Versuchs

Messen Sie die Spannung am Motor, die Stromaufnahme, die Kraft an den beiden Kraftmessern und die Drehzahl des Motors!

Wiederholen Sie die Messungen mit Spannungen, die um ± 1 V von der Nennspannung abweichen! Führen Sie die Messungen bei jeder Spannung mindestens zweimal aus!

Tragen Sie die Meßwerte in ein Meßprotokoll ein, das im Kopf folgende Angaben enthält:
U in V, I in A, P in W, F_1 in N, F_2 in N, $F_2 - F_1$ in N, r in m, n in s^{-1} .

Auswertung des Versuchs

Berechnen Sie die elektrischen Leistungen, die Drehmomente, die Winkelgeschwindigkeiten, die mechanischen Leistungen und die Wirkungsgrade!

Fertigen Sie mit den errechneten Werten eine Tabelle an, die enthalten muß:

P_{el} in W, M in N · m, ω in s^{-1} , P_{mech} in W, Wirkungsgrad!

Beachten Sie, daß Sie die Drehzahl in min^{-1} messen, für die Berechnung aber s^{-1} benötigen!
Bilden Sie die Mittelwerte der errechneten Größen!
Diskutieren Sie die Abweichungen der Einzelwerte untereinander und vom Mittelwert!
Diskutieren Sie den ermittelten Wirkungsgrad des Motors!

Das vom Elektromotor an der Welle abgegebene Drehmoment ist natürlich abhängig von den elektrischen Größen dieses Motors. Ganz allgemein gilt für elektrische Maschinen, daß das Drehmoment das Produkt aus dem magnetischen Fluß Φ des Feldes, der Läuferstromstärke I und einer spezifischen Konstante c ist. In diese Konstante gehen solche durch den Bau der Maschine festgelegten Größen wie Läuferdurchmesser, Luftspaltfläche und Leiterlänge ein.

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \quad (16)$$

Gleichstrommotoren

Die Ständer der Motoren tragen Wicklungen zur Erzeugung des Magnetfeldes, die Läuferwicklungen sind die stromdurchflossenen Spulen, auf die nach dem elektromotorischen Prinzip Kräfte wirken.

Zur Unterdrückung der Wirbelströme, die bei der Induktion der Gegenspannung im Läufer entstehen, besteht der Eisenkörper des Läufers aus geschichteten Blechen.

Um die Wirbelstromverluste so gering wie möglich zu halten, sind die einzelnen Bleche des Läuferpaketes außerdem noch mit Isolierlack gegeneinander isoliert.

Die Eisenkerne der Ständerwicklungen bei Gleichstrommotoren brauchen nicht aus geschichteten Blechen hergestellt zu werden.

Da zur Erregung des Magnetfeldes Gleichstrom durch die Ständerspulen fließt, ist die Voraussetzung für die Entstehung von Wirbelströmen, die zeitliche Änderung des Magnetfeldes, nicht gegeben.

Anlaufstrom. Bei größeren Gleichstrommotoren wird die Begrenzung der Anlaufstromstärke (\nearrow S. 128) besonders wichtig. Motoren mit einer Leistung über 1,5 kW können nur über einen Vorwiderstand, einen sog. Anlaßwiderstand, eingeschaltet werden. Hohe Einschaltstromstärken belasten die Lamellen des Kollektors sehr stark. Das muß unter allen Umständen vermieden werden. Die aus diesem Grund notwendigen Anlaßwiderstände erfordern bei größeren Gleichstrommotoren einen erheblichen technischen Aufwand, denn der Widerstand muß mit steigender Drehzahl verkleinert und beim Erreichen der Nenndrehzahl kurzgeschlossen werden. Außerdem darf die Stromstärke für das Erregerfeld des Ständers nicht gleichzeitig begrenzt werden, denn der Gleichstrommotor muß beim Anlauf die volle Feldstärke zur Verfügung haben, damit er auch mit niedrigen Drehzahlen bereits ein ausreichendes Drehmoment entwickelt. Die Steuerung der Anlaufstromstärke und der Drehzahl über vorgeschaltete Widerstände ist eine energetisch sehr ungünstige Lösung, denn in den Vorwiderständen wird elektrische Energie umgesetzt, die keinen Beitrag zur Erzeugung des Drehmoments liefert. Deshalb geht man in modernen Anlagen mehr und mehr zu Steuerungen mit geringerer Verlustleistung über. Man verwendet hierfür Thyristorsteuerungen, die nahezu leistungslos die Anlaufstromstärke begrenzen. ①

① Durch die Vorwiderstände wird die Stromaufnahme des Motors und damit seine Energieaufnahme nicht erhöht. Wieso ist es trotzdem gerechtfertigt, von Leistungsverlusten durch die Widerstände zu sprechen?

Welche Wirkung hinsichtlich der Stromaufnahme und des Leistungsverlustes haben parallel zur Feldwicklung oder zum Anker geschaltete Widerstände?

Drehrichtung. Die Drehrichtung eines Gleichstrommotors läßt sich nicht einfach durch Vertauschen der Polarität der angelegten Spannung umkehren. ①

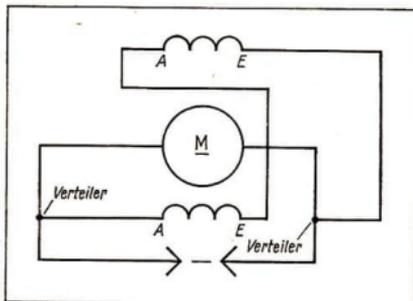
Untersuchen Sie die Drehrichtungsänderung nach der folgenden Versuchsbeschreibung!

Geräte

Generator-Motormodell, Spannungsquelle, Feldspulen mit 1200 Windungen, Doppel-T-Anker.

Vorbereitung des Versuchs

Befestigen Sie die Eisenkerne des Feldmagneten mit den Spulen (1200 Windungen) am Ständer. Setzen Sie den Doppel-T-Anker ein, und richten Sie die Kohlebürsten auf den Kommutator! Schalten Sie die beiden Feldspulen entsprechend des Schaltplanes im Bild 134/1 hintereinander, indem Sie den Anfang einer Spule mit dem Ende der anderen verbinden! Verbinden Sie die Spulenanschlüsse und die Bürsten mit je einem Verteiler und die beiden Verteiler mit einer Gleichspannungsquelle von etwa 10 V!



134/1 Schaltplan eines Gleichstrommotors

Durchführung des Versuchs

Schalten Sie die Spannung ein, und beobachten Sie die Drehrichtung des Motors!

Verändern Sie die Polarität der angelegten Gleichspannung, und beobachten Sie die Drehrichtung! Ändern Sie nacheinander die Polarität an den Feldspulen und am Anker, indem Sie die entsprechenden Leitungen an den Verteilern vertauschen!

Beobachten Sie dabei stets die Drehrichtung!

Auswertung des Versuchs

Fixieren Sie Ihre Beobachtungen etwa in folgender Form!

Drehrichtung
gleich/geändert

Polaritätsänderung an Feld und Anker

Polaritätsänderung am Feld

Polaritätsänderung am Anker

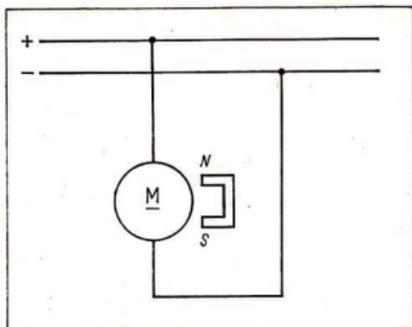
Formulieren Sie das Ergebnis Ihres Versuches als Merksatz!

Beim Motor des Versuches 9 stellt sich entsprechend der Polarität der angelegten Spannung eine bestimmte Richtung des Magnetfeldes und des Stromes durch den Läufer ein, und in Abhängigkeit davon hat der Motor eine bestimmte Drehrichtung. Die Kraft, die die Drehung hervorruft, ändert ihren Richtungssinn nicht, wenn Feld und Strom gleichzeitig die Richtung ändern. Nur die Richtungsänderung einer der beiden Größen führt zur Umkehr des Drehsinns.

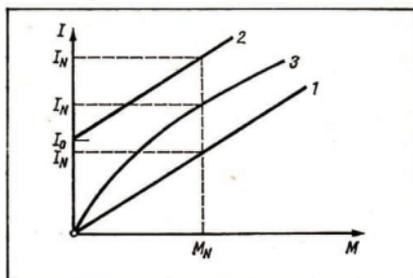
Auf den Gleichstrommotor übertragen heißt dies, daß entweder die Polarität der das Magnetfeld verursachenden Spannung oder die Polarität der Spannung am Läuferkreis vertauscht werden muß, damit der Motor die Drehrichtung ändert.

* Technische Ausführung und Eigenschaften von Gleichstrommotoren

Um Entscheidungen über den effektiven Einsatz eines Motors treffen zu können, sind u. a. zwei Eigenschaften des Motors von besonderer Bedeutung: Die Abhängigkeit der Stromaufnahme und der Drehzahl vom Drehmoment. Beide Eigenschaften sollen an einigen Motoren betrachtet werden.



135/1
Schaltplan eines Permanentmotors

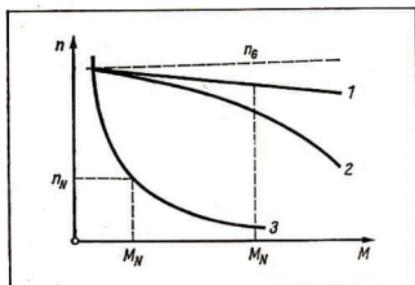


135/2 $I = f(M)$ an Motoren
1 — Permanentmotor
2 — Nebenschlußmotor
3 — Reihenschlußmotor

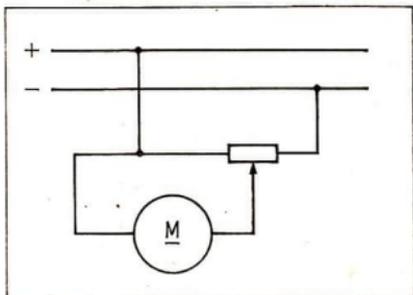
Permanentmotoren. Aus Bild 135/1 geht hervor, daß Permanentmotoren keine Feldwicklung zur Erzeugung des Erregerfeldes enthalten. Der magnetische Fluß des Erregerfeldes wird von einem Dauermagneten bereitgestellt. Als Werkstoff für den Feldmagneten verwendet man heute oft keramische Magnete. ^②

Ihr Magnetfeld genügt, um bei kleineren Leistungen im Zusammenwirken mit dem Läuferfeld das Drehmoment zu erzeugen.

Messen Sie an einem Permanentmotor (Spielzeugmotor, Motor aus Baukasten Elektronik V o. ä.) die Stromaufnahme bei unterschiedlicher Belastung! Bremsen Sie dazu die Welle des Motors mit den Fingern ab!



135/3 $n = f(M)$ an Motoren
1 — Permanentmotor
2 — Nebenschlußmotor
3 — Reihenschluß- und Universalmotor



135/4
Permanentmotor an variabler Spannung

- ① Überlegen Sie, warum sich die Drehrichtung eines Gleichstrommotors nicht ändert, wenn bei Feld- und Läuferwicklung gleichzeitig die Stromrichtung geändert wird!
- ② Demontieren Sie einen defekten Spielzeugmotor! Untersuchen Sie den Anker und den Feldmagneten! Betrachten Sie den Kollektor, die Bürsten und die Isolierung der Bürsten gegenüber dem Gehäuse! Versuchen Sie den Feldlinienverlauf des Feldmagneten durch Eisenfeilspäne darzustellen!

Da bei Permanentmotoren der Magnetfluß konstant ist, ist die Arbeitsstromstärke dem Drehmoment direkt proportional (Bild 135/2).

Aus Bild 135/3 wird die Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung ersichtlich. Die Grunddrehzahl des Motors wird durch die angelegte Spannung bestimmt. Bei Belastung sinkt die Drehzahl proportional zum Drehmoment, das der Motor aufbringen muß. Die Steuerung der Drehzahl, die sog. Drehzahlstellung, ist über die Veränderung der Klemmenspannung am Läufer möglich.

11

▼ Betreiben Sie einen Permanentmotor über eine Potentiometerschaltung (Bild 135/4), und beobachten Sie die Drehzahl!

Das Potentiometer sollte einen Widerstand von 50 Ω bis 100 Ω bei einer Belastbarkeit von 2 bis 4 W haben. Zur Beobachtung der Drehzahl ist es günstig, wenn auf der Rotorwelle eine Antriebscheibe, Stroboskopscheibe oder ähnliches angeordnet ist.

Permanentmotoren werden für geringe Leistungen gebaut. Sie verfügen über ein hohes Anlaufmoment und sind bei Überlastung thermisch gefährdet.

Sie werden in der Steuerungs- und Regelungstechnik als Stellmotoren, im Modellbau und in elektromechanischem Spielzeug eingesetzt. In neuerer Zeit wächst ihre Bedeutung für die Steuer- und Regeltechnik infolge der immer stärkeren Rationalisierung und Automatisierung der Produktion erheblich. Der Einsatz der Permanentmotoren erfolgt u. a. wegen ihrer Vorteile hinsichtlich

- des hohen Wirkungsgrades infolge fehlender Erregerverluste,
- der Drehzahlkonstanz bei mäßiger Belastung,
- der billigen Fertigung infolge des einfachen Aufbaus.

Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Die vereinfachte Schaltung eines Nebenschlußmotors ohne Anlaß- und Feldwiderstand zeigt Bild 136/1. Beim Nebenschlußmotor wird die Spule des Feldmagneten parallel zum Läuferkreis geschaltet.

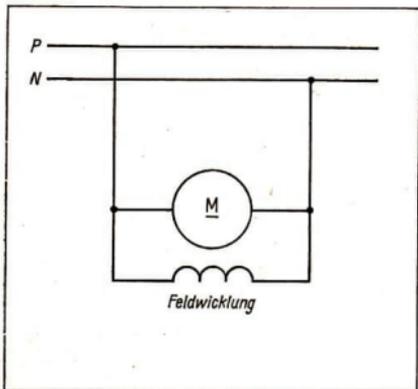
12

▼ Untersuchen Sie die Eigenschaften eines Nebenschlußmotors nach PSV 9, V 3.1.6.!

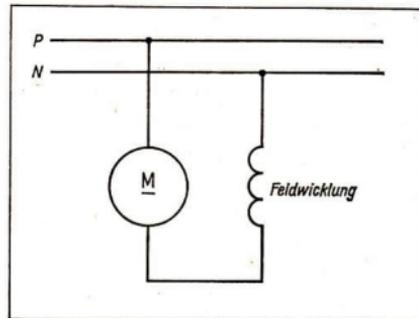
Die Stromaufnahme des Nebenschlußmotors setzt sich zusammen aus der Arbeitsstromstärke I_a im Läuferkreis und der Erregerstromstärke I_e in den Feldwicklungen.

Der Erregerstrom fließt auch bei unbelastetem Motor in voller Stärke. Bei Belastung steigt die Arbeitsstromstärke stark an und wird bei Überlastung unzulässig hoch. Die grafische Darstellung dieser Zusammenhänge zeigt Bild 135/2.

136/1 Schaltplan eines Nebenschlußmotors



136/2 Schaltplan eines Reihenschlußmotors



Bei der Untersuchung der Lastabhängigkeit der Drehzahl kommt man zu der Feststellung, daß sich die Drehzahl des Nebenschlußmotors bei Belastung bis zum zulässigen Nennwert nur unwesentlich ändert. Dieses Verhalten ist das typische Kennzeichen des Nebenschlußmotors. Deshalb wird auch oft von Motoren anderer Stromarten mit der gleichen Eigenschaft gesagt, sie zeigen Nebenschlußverhalten. Die Lastabhängigkeit der Drehzahl ist in Bild 135/3 dargestellt. Wegen der nahezu konstanten Drehzahl findet der Nebenschlußmotor u. a. als Antrieb für Werkzeugmaschinen Verwendung.

Außerdem wird er heute oft in automatisierten Anlagen eingesetzt, da sich seine Drehzahl durch Veränderung des magnetischen Flusses oder über die Klemmenspannung relativ leicht stellen läßt.

Gleichstrom-Reihenschlußmotor. Der Name dieses Motors sagt aus, daß die Feldwicklung in Reihe zur Läuferwicklung geschaltet ist (Bild 136/2).

Diese Schaltung bedingt einige Besonderheiten des Motors. Da der gesamte Arbeitsstrom des Motors, der in der Läuferwicklung für die Erzeugung des Drehmoments erforderlich ist, durch die Feldwicklung fließt, muß diese einen geringen Widerstand haben. ①

Sie besteht deshalb aus wenigen Windungen dicken Drahtes.

13



Führen Sie nach PSV 9, V 3.1.6. einen Versuch zur Ermittlung der Eigenschaften eines Reihenschlußmotors durch!

Auch beim Reihenschlußmotor ist die Anlaufstromstärke erheblich größer als die Betriebsstromstärke. Bei laufendem Motor ist die Stromaufnahme von der Belastung abhängig, allerdings in nicht so starkem Maße wie beim Nebenschlußmotor (Bild 135/2). Aus dem Diagramm läßt sich ablesen, daß im Leerlauf nur ein Strom geringer Stärke fließt. Mit zunehmender Belastung steigt die Stromstärke nicht linear, sondern nur proportional der Wurzel aus dem Drehmoment. Das bedeutet, daß der Reihenschlußmotor schon bei niedrigen Stromstärken große Drehmomente aufbringen kann. Bei Überlastung ist der Reihenschlußmotor bei weitem nicht so gefährdet wie der Nebenschlußmotor, denn seine Stromaufnahme bleibt auch dann in vertretbaren Grenzen.

Auch das Drehzahlverhalten des Reihenschlußmotors weicht erheblich von dem des Nebenschlußmotors ab.

Bild 135/3 macht deutlich, daß die Drehzahl stark von der Belastung abhängig ist. Der Grund dafür ist die Abhängigkeit der Erregerfeldstärke vom Arbeitsstrom des Motors. Im Leerlauf ist die Arbeitsstromstärke sehr gering und damit auch der magnetische Fluß des Erregerfeldes. Die Folge ist ein Ansteigen der Drehzahl bis zu Werten, die für den Motor gefährlich werden können, weil die bei hohen Drehzahlen auftretenden Fliehkräfte den Motor mechanisch überlasten. ②

Bei starker Belastung hat der Motor eine sehr geringe Drehzahl.

Damit der Reihenschlußmotor beim Einschalten keine unzulässig hohen Drehzahlen erreicht, darf er nicht ohne Belastung eingeschaltet werden. Er wird deshalb starr mit der Arbeitsmaschine verbunden. Das ist möglich, weil der Motor beim Anlaufen bereits ein sehr großes Drehmoment entwickelt.

Entsprechend seiner Eigenschaften wird der Reihenschlußmotor dort eingesetzt, wo große Drehzahlbereiche beherrscht werden müssen und große Anlaufmomente gefor-

① Untersuchen Sie am Anlasser eines Kraftfahrzeuges die Feldwicklung, die Läuferwicklung mit dem Kollektor und die Stromzuführungsbürsten!

② Gleichstromreihenschlußmotoren dürfen für Antriebe mit Riemtrieb nicht verwendet werden. Nennen Sie den Grund!

dert werden. Das ist bei Hebezeugantrieben und den Antrieben elektrischer Bahnen ebenso der Fall wie bei Anlassern von Verbrennungsmotoren und den Antrieben von Aufzügen. ①

Zusammenfassung

Gleichstrommotoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie auf der Grundlage des elektromotorischen Prinzips um. Ihre Eigenschaften sind abhängig von der Konstruktion des Motors und der Schaltung der Ständer- und der Läuferwicklung zueinander.

In der folgenden Übersicht sind einige Gleichstrommotoren und ihre wichtigsten Eigenschaften zusammengestellt.

	Permanentmotor	Nebenschlußmotor	Reihenschlußmotor
Schaltung von Läufer- und Erregerwicklung	keine Erregerwicklung	parallel	in Reihe
Drehzahlstellung	durch Klemmenspannung	Feldwiderstand	Vorschaltwiderstand
Drehzahlverhalten	geringe Änderung bei Belastung	fast konstante Drehzahl	stark lastabhängig
Anlaufmoment	groß	gering	groß
Verhalten bei Überlast	thermisch gefährdet	thermisch gefährdet	hoch überlastbar
Hauptanwendung	Kleinstmotore Stellmotore	Antrieb von Werkzeugmaschinen	Fahr- und Hebezeuge

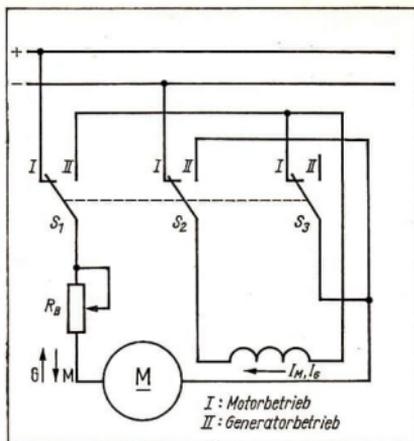
Gleichstrommotoren als Generatoren

Wenn kleinere Elektromotoren abgeschaltet werden, hört ihre Drehbewegung infolge der geringen rotierenden Massen und der Lagerreibung schon kurz nach dem Abschalten auf. Größere Motoren, die unter Umständen noch mit Schwungmassen verbunden sind, behalten durch ihre große Massenträgheit die Bewegung noch geraume Zeit bei. Um den Motor zum Stillstand zu bringen, können mechanische Bremsen eingesetzt werden, die die Rotationsenergie in Wärmeenergie umwandeln. Es ist jedoch ökonomischer, die Motoren auf elektrischem Wege zu bremsen. Dabei nutzt man die Möglichkeit der Umkehrung der Energieumwandlung im Motor und benutzt ihn als Generator. Die am häufigsten angewendeten Bremsverfahren sind die **Widerstands- und die Nutzbremung**. Bei der Nutzbremung wird die aus der Rotationsenergie gewonnene Elektroenergie dem Netz wieder zugeführt. Diese Nutzbremung ist ein Verfahren zur Erhöhung der Fahrleistung batteriegetriebener Elektrofahrzeuge. Bei jedem Bremsvorgang wird der Motor automatisch auf Generatorbetrieb umgeschaltet und die erzeugte Elektroenergie zum Laden der Batterie benutzt. ②

Die Widerstandsbremung wird u. a. bei Straßenbahnen zur Heizung der Fahrgasträume benutzt. Sobald der Bremsvorgang eingeleitet wird, ist der Läufer des Motors

vom Netz getrennt und so in Reihe zur Feldwicklung geschaltet, daß der Motor als Generator arbeitet (Bild 139/1).

Blieben die Feldspulen bei Generatorbetrieb gleichsinnig wie beim Läuferbetrieb angeschlossen, würde die geänderte Stromrichtung in den Feldspulen den Restmagnetismus in diesen zerstören und eine Selbsterregung unmöglich machen. Beim Nebenschlußmotor wird lediglich der Läufer vom speisenden Netz getrennt und an die Bremswiderstände angeschlossen. Das Bremsmoment wird durch das bei jedem belasteten Generator auftretende Gegenmoment gebildet. Die Größe des in Reihe zum Läufer und der Feldwicklung geschalteten Widerstandes bestimmt die Größe des Bremsmoments.



139/1 Reihenschlußmotor mit Bremswiderstand

Führen Sie nach PSV 9, V 3.1.7. einen Versuch zur Benutzung eines Motors als Generator und zur Widerstandsbremung durch!

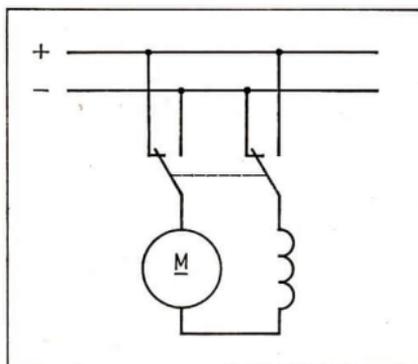
Wechselstrommotoren

Wechselstrommotoren sind Induktions- oder Kommutatormotoren. Zu den Induktionsmotoren zählen z. B. die Synchron- und Asynchronmotoren, bei denen die Läuferbewegung durch ein Wechsel- oder Drehfeld hervorgerufen wird. Auf sie soll nicht eingegangen werden.

Physikalische Grundlagen der Kommutatormotoren. Im Versuch wurde festgestellt, daß bei Gleichstrommotoren eine Polaritätsänderung an Feld und Anker gleichzeitig nicht zu einer Richtungsänderung des Läufers führt.

Schließen Sie einen Gleichstromreihenschlußmotor über einen Umschalter an die Spannungsquelle nach Bild 139/2 an!

Ändern Sie die Polarität in kurzen Abständen und beobachten Sie die Drehrichtung des Läufers!



139/2 Reihenschlußmotor über Umschalter am Gleichstromnetz

- ① Die Anlasser der Zweitaktmotoren des „Trabant“ und des „Wartbug“ haben eine geringere Leistung als die der Fahrzeuge „Lada“ und „Moskwitsch“, denn sie brauchen ein geringeres Drehmoment aufzubringen als die Anlasser der Viertaktmotoren. Welche Gründe gibt es dafür?
- ② Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man zu dem Schluß kommen, daß Elektrofahrzeuge bei Fahrten in bergigem Gelände die Elektroenergie, die bei Bergfahrten den Batterien entnommen wird, bei Talfahrten wieder in den Batterien speichern. wodurch insgesamt der Ladezustand der Akkumulatoren nicht verändert wird. Widerlegen Sie diese Annahme!

Ließe sich beim Motor nach Bild 139/2 eine sehr hohe Umschaltfrequenz erreichen, dann lägen die gleichen Verhältnisse vor, wie beim Betreiben des Motors mit Wechselspannung.

Schließen Sie den Reihenschlußmotor an eine Wechselspannungsquelle an!
Beim Anlegen der Wechselspannung ändern sich die Richtung des Magnetflusses in der Erregerwicklung und die Stromrichtung im Anker im Rhythmus der Frequenz des Wechselstroms. Demzufolge wirkt das entstehende Drehmoment ständig in der gleichen Richtung.

Gleichstrommotoren können auch mit Wechselstrom betrieben werden.

Technische Ausführung von Wechselstrommotoren. In der Technik verwendet man spezielle Wechselstrommotoren. Deren Ständereisenkerne sind im Gegensatz zu Gleichstrommotoren geblättert, damit die Wirbelstromverluste gering gehalten werden. Beim Läufer sind die Unterschiede zwischen beiden Motorenarten gering.

Reihenschlußmotoren. Das Betriebsverhalten von Wechselstrom-Reihenschlußmotoren entspricht im wesentlichen dem von Gleichstrom-Reihenschlußmotoren. (↗ S. 137) Wie bei diesen hängt das entwickelte Drehmoment vom Magnetfluß und dem Ankerstrom ab. ①

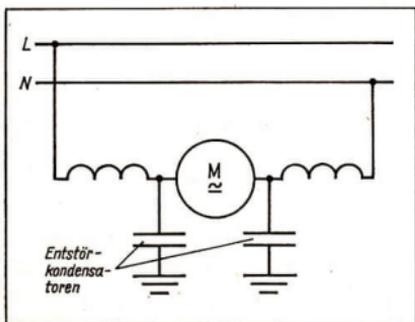
Ein „Durchgehen“ des Motors wie beim Gleichstrommotor ist nicht zu befürchten. Der Grund hierfür ist der induktive Blindwiderstand des Wechselstrommotors. Diesem Vorteil steht der Nachteil gegenüber, daß die Änderung der Drehzahl des Wechselstrommotors nur über die angelegte Spannung möglich ist. ②

Diese Spannungssteuerung verwendet man auch beim Anlaufen des Motors, der bei größerer Leistung über einen Stelltransformator mit niedriger Spannung „angefahren“ wird. Die kleine Spannung beim Anlauf verhindert ein zu starkes Anwachsen der Anlaufstromstärke. Wechselstromreihenschlußmotoren werden heute vorrangig zum Betrieb elektrischer Bahnen eingesetzt. Das bringt zwei wesentliche Vorteile:

1. Das für den Bahnbetrieb vorteilhafte Betriebsverhalten der Gleichstrom-Reihenschlußmotoren zeigen auch die Wechselstrommotoren, sie entwickeln also ein hohes Anzugsmoment und sind gegen Überlastung unempfindlich.
2. Der Transport der Elektroenergie kann bei Wechselstrom mit hoher Spannung erfolgen, wodurch die Übertragungsverluste gering bleiben. In den Triebfahrzeugen muß der Wechselstrom lediglich herabtransformiert werden, eine Gleichrichtung zum Betrieb der Motoren entfällt.

Bahnmotoren werden mit einer Leistung bis zu 1000 kW gebaut.

Universalmotor. Universalmotoren sind vom Aufbau her Reihenschlußmotoren. Da sie nur für kleine Leistungen etwa zwischen 10 Watt und 500 Watt gebaut werden, kann ihr Aufbau erheblich einfacher sein als der größerer Motoren.



140/1
Schaltplan eines Universalmotors

Damit die Motoren trotz ihres einfachen Aufbaus das notwendige Drehmoment aufbringen können, sind die Bleche des Läufers und des Ständers in besonderer Weise geformt, die von den üblichen Formen der Blechschnitte abweicht. ③

Universalmotoren können wahlweise mit Gleich- oder Wechselstrom betrieben werden.

In beiden Fällen zeigt der Motor Reihenschlußverhalten, d. h., Arbeitsstrom und Drehmoment sind drehzahlabhängig. Der Motor entwickelt bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment, das mit steigender Drehzahl zurückgeht. (Bild 135/3)

Da das im Motor entstehende Bürstenfeuer störend auf den Funkempfang wirkt, muß durch die Zuschaltung von Kondensatoren die Entstehung hochfrequenter Wechselströme verhindert werden (Bild 140/1).

Drehrichtungsänderungen sind am Universalmotor wie bei Gleichstrommotoren durch Umpolen der Feld- oder der Ankerwicklung möglich. Universalmotoren finden in vielen Haushaltgeräten, Büromaschinen, elektrischen Bohrmaschinen u. a. Anwendung, kurz überall dort, wo bei kleinen Leistungen robuste Motoren benötigt werden.

Linearmotoren. Linearmotoren sind Induktionsmotoren. Ihre Besonderheit besteht darin, daß Läufer und Ständer mechanisch voneinander völlig getrennt sind und der Läufer nicht rotiert, sondern eine geradlinige Bewegung ausführt. Das bringt vor allem an solchen Arbeitsmaschinen Vorteile, bei denen das Werkzeug geradlinige Bewegungen ausführt, z. B. an Hobelmaschinen, Fördereinrichtungen, Laufkränen. Für schienengebundene Fahrzeuge ist der Linearmotor besonders vorteilhaft, weil er kein Zahnradgetriebe zur Drehzahlumsetzung und kein Reibradgetriebe zur Vorwärtsbewegung benötigt. Weitere Vorteile des Linearmotors sind:

Die Kraft wird ohne mechanische Berührung auf einer großen Fläche auf die Läufer-schiene übertragen.

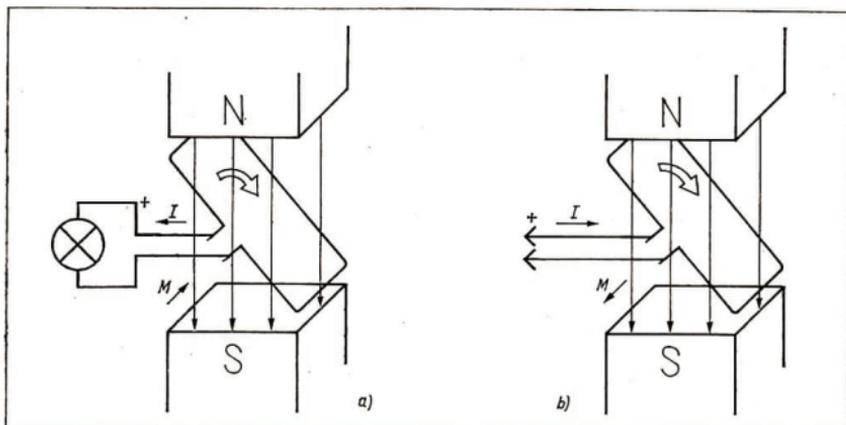
Die Zugkraft wird unabhängig von der Haftreibung übertragen. Die bei rotierenden Maschinen auftretende Fliehkraft gibt es nicht, deshalb lassen sich höhere Geschwindigkeiten mit dem Linearmotor erreichen als mit herkömmlichen Umlaufmotoren. Die Nutzung dieser Vorteile hat begonnen, dem Linearmotor bleiben noch weite Anwendungsgebiete offen. Schon heute werden Linearmotoren zur Förderung flüssiger Metalle in Kernenergieanlagen eingesetzt. Dazu wird die das Wanderfeld erzeugende Ständerwicklung um die Förderrohre gelegt und als Läufer das zu befördernde Metall genutzt. Eine solche Pumpe arbeitet praktisch verschleißfrei, ist unkompliziert im Aufbau und damit billig in der Herstellung.

Zusammenfassung

Motoren wandeln entsprechend dem elektromotorischen Prinzip elektrische in mechanische Energie um. Diese Energieumwandlung ist grundsätzlich umkehrbar. Motoren können demzufolge auch als Generatoren bzw. Generatoren als Motoren arbeiten. In der Elektrotechnik wird deshalb häufig nicht von Generatoren und Motoren, sondern von Wechselstrom-, Gleichstrom-, Synchron- oder Asynchronmaschinen gesprochen. Bild 142/1 zeigt noch einmal den prinzipiellen Aufbau einer rotierenden elektrischen Maschine. Die Zuführung mechanischer Energie (142/1a) führt zur Ro-

-
- ① Begründen Sie den Zusammenhang zwischen der Größe des Ankerstromes und des Magnetflusses beim Reihenschlußmotor!
 - ② Wie entsteht ein induktiver Widerstand und welche Auswirkungen hat er im Wechselstromkreis?
 - ③ Demontieren Sie einen defekten Staubsaugermotor, den Motor einer defekten Kaffeemühle, einer nicht mehr gebrauchsfähigen Bohrmaschine oder eines unbrauchbaren Lüfters!

tation der Leiterschleife und zur Erzeugung elektrischer Energie. Wenn jedoch der Leiterschleife elektrische Energie zugeführt wird (142/1 b), dann wird von der rotierenden Leiterschleife mechanische Energie abgegeben. In beiden Fällen hat sich dabei lediglich die Stromrichtung und die Richtung des Drehmoments geändert. Neben dieser Umkehrbarkeit der Energiewandlungen an elektrischen Maschinen ist bei Motoren stets zu beachten, daß motorische und generatorische Vorgänge gleichzeitig ablaufen.



142/1 Prinzip rotierender elektrischer Maschinen

a) Generator

b) Motor

Elektrische Antriebe und ihre Anpassung an Arbeitsmaschinen

Historische Entwicklung der Antriebe. Die Geschichte der elektromotorischen Antriebe ist relativ jung. Noch um das Jahr 1840 beherrschten Dampfmaschinen das Feld der Antriebe von Maschinen. Umfangreiche Transmissionsanlagen mußten die mechanische Energie zu den einzelnen Maschinen übertragen. Daran änderte sich zunächst auch nichts, als um 1900 der Elektromotor die Dampfmaschine ersetzte. Erst nachdem die Elektromotoren immer kleiner und leistungsfähiger wurden, konnte durch den Gruppenantrieb mehrerer Maschinen der Einmotorenantrieb für alle Maschinen einer Werkhalle ersetzt werden. Mit der weiteren Entwicklung der Produktivkräfte kam es dann ab etwa 1920 zur Einführung des Einzelantriebs für Werkzeugmaschinen. Auch der Einmotorenantrieb besaß noch Nachteile. An komplizierten Bearbeitungsmaschinen mußten zur Ausführung unterschiedlicher Bewegungen zahlreiche mechanische Getriebe eingesetzt werden. Heute benutzt man für viele Maschinen den Mehrmotorenantrieb, der im wesentlichen folgende Vorteile bietet:

- Die elektrische Energie läßt sich leicht an die gewünschte Stelle bringen und dort in mechanische Energie umwandeln. Getriebe sind dabei nur noch begrenzt erforderlich, und der Antrieb läßt sich spezifisch den jeweiligen Erfordernissen anpassen.
- Der Verschleiß der Motoren ist geringer und tritt bei den einzelnen Motoren in unterschiedlicher Stärke auf.

- Der Energiefluß in der Maschine wird übersichtlicher und ist dadurch leichter zu beherrschen.
- Die Schaltzeiten solcher Maschinen sind kleiner und der Einsatz dadurch effektiver.
- Motoren geringerer Leistung arbeiten geräuschärmer und tragen damit zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen bei.
- Noch erforderliche Getriebe sind kleiner und weniger kompliziert.

Motor und Arbeitsmaschine. Zu den wichtigsten Größen, die Einfluß auf die Wahl des Antriebs für eine Arbeitsmaschine haben, gehört das Drehmoment, das zum Betreiben einer Arbeitsmaschine aufgebracht werden muß. Dieses von der Arbeitsmaschine geforderte Drehmoment bezeichnet man als Widerstands-Drehmoment M_W , dem das Antriebs-Drehmoment M_M des Motors auf jeden Fall gleich sein muß. Hinzu kommt jedoch, daß sowohl der elektrische Antrieb wie auch die Arbeitsmaschine Schwungmassen enthalten, die beim Anlaufen und bei jeder Drehzahländerung beschleunigt werden müssen. Der Motor muß also außer dem Widerstands-Drehmoment auch das Beschleunigungs-Drehmoment M_B aufbringen.

$$M_M = M_W + M_B \quad (17)$$

Bei den heute üblichen Arbeitsgeschwindigkeiten beträgt das Beschleunigungs-Drehmoment oft das Mehrfache des Widerstands-Drehmoments der Arbeitsmaschine.

Bei den einzelnen Motorenarten wurde gezeigt, daß es für jede Motorenart ein typisches Drehzahl-Drehmomentverhalten gibt. Solche typischen Kennlinien existieren auch für bestimmte Arten von Arbeitsmaschinen. ^①

Aus diesen Kennlinien lassen sich bereits Vorentscheidungen für den Einsatz eines Motors an einer bestimmten Arbeitsmaschine treffen.

Eine besondere Rolle bei der Anpassung des Antriebs an die Arbeitsmaschine spielt die Drehzahl. Im einfachsten Fall stimmt die an der Arbeitsmaschine geforderte Drehzahl mit der Nenndrehzahl des Motors überein. In solchen Fällen genügt es, Motor und Antriebsmaschine starr oder über eine Kupplung zu verbinden. Solche Kupplungen, die meistens auch erforderlich sind, wenn zwischen Motor und Arbeitsmaschine ein Getriebe zwischengeschaltet wird, arbeiten heute sehr oft elektromagnetisch oder induktiv. Das hat den Vorteil, daß die Kopplungskräfte zwischen Motor und Maschine in einfacher Weise steuerbar sind.

Haben Motor und Arbeitsmaschine unterschiedliche Drehzahlen, dann werden zur Anpassung der Drehzahlen Riementriebe, Zahnradgetriebe und Schneckengetriebe verwendet.

Ihre Anwendung richtet sich nach den jeweiligen Einsatzbedingungen.

Bei modernen Antriebssystemen wird zunehmend die Möglichkeit der Drehzahlstellung der Motoren genutzt, die den Einbau eines zusätzlichen mechanischen Getriebes überflüssig macht.

Wenn auch der Drehstrom-Asynchronmotor infolge seines einfachen Aufbaus und neuerdings dank der durch die Mikro- und Leistungselektronik immer besser beherrschbaren Drehzahlstellbarkeit für viele Industriebereiche der wichtigste Antrieb ist, so wird auch der Gleichstrommotor künftig seinen Platz unter den Antrieben behaupten, denn bei ihm sind Drehzahlsteuerungen mit geringstem Aufwand und geringen Verlusten möglich.

① Informieren Sie sich während der produktiven Arbeit in Ihrem Betrieb, wie die Probleme der Anpassung der Drehzahlen der Motoren und Arbeitsmaschinen gelöst werden!

Die Tabelle gibt eine Information über die wichtigsten Arten und ihre Einsatzbedingungen.

Motor	Stellglied	Drehzahl	Leistung	Kosten	Anwendung
Gleichstrommotor	Gleichrichter und Stelltransformator	großer Bereich	bis 20 kW	gering	ungeregelte Antriebe mit geringen technischen Forderungen
	steuerbare Gleichrichter	großer Bereich	alle Leistungsbereiche	gering	Be- und Verarbeitungs- maschinen, Lokomotiven
Drehstrommotoren	Drehstromsteller	begrenzter Bereich	bis 200 kW	hoch	Hebezeuge
	Frequenzsteller (rotierend)	begrenzter Bereich	bis 100 kW	hoch	Textilindustrie, Walzwerke
	Frequenzumformer	großer Bereich	alle Leistungsbereiche	gering	Textilindustrie, Walzwerke, Lokomotiven

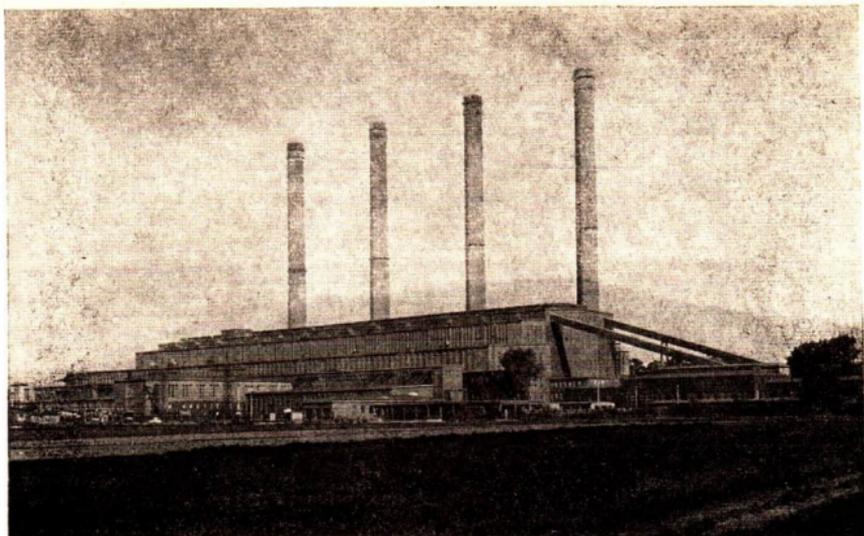
Neben den genannten leistungsabhängigen Kriterien haben noch eine Reihe anderer Faktoren Einfluß auf die Anpassung des Motors an die Arbeitsmaschine.

Dazu gehören die thermische Belastbarkeit des Antriebs, sein Masse-Leistungs-Verhältnis, seine äußere Bauform, Bremsbarkeit, die Nennbetriebsart und andere. ① Entsprechend all dieser Bedingungen wählt der Anwender unter den zur Verfügung stehenden Antriebssystemen das für ihn geeignetste aus. Unter Umständen wird auch der Anwender gezwungen, entsprechend des Motorenangebots seine Konstruktionen zu variieren, damit nicht für jeden speziellen Anwendungsfall ein spezifischer Motor entwickelt werden muß.

2. Übertragung elektrischer Energie

Probleme des Transports elektrischer Energie. Elektroenergie wird in der DDR überwiegend in Wärmekraftwerken auf Braunkohlebasis produziert. Die Standorte der Wärmegroßkraftwerke konzentrieren sich auf die Bezirke Halle, Leipzig und Cottbus, denn es ist ökonomischer, die Elektroenergie über größere Entfernungen zu transportieren als kleine Kraftwerke über das ganze Land zu verteilen und die Rohbraunkohle zu den Verarbeitungsstätten zu befördern.

Ogleich der Transport der Elektroenergie im Vergleich zum Transport anderer Energieträger einfach erscheint, erfordert die Übertragung großer Energiemengen über



145/1 Wärmekraftwerk

größere Entfernungen einen erheblichen technischen Aufwand. Die Fernübertragung elektrischer Energie erfolgt auf verschiedenen Spannungsebenen (Bild 146/1). Die Höhe der Spannung richtet sich nach der Übertragungsentfernung und der zu übertragenen Leistung. Die folgende Tabelle enthält einige Richtwerte.

Spannung	Leistung	Entfernung
10 kV	bis 2 MW	über 8 km
20 kV	bis 2 MW	über 20 km
110 kV	bis 70 MW	über 40 km
220 kV	bis 150 MW	über 200 km
380 kV	bis 600 MW	über 400 km

Bei Entfernungen über 500 km werden auch noch höhere Übertragungsspannungen verwendet.

Die Notwendigkeit hoher Spannungen bei der Übertragung der Elektroenergie über größere Entfernungen hat mehrere Gründe. Nachfolgend werden die wichtigsten genannt:

- ① Das Beschleunigungs-Drehmoment eines Motors entspricht der kinetischen Energie, die aufgebracht werden muß, um seine Masse mit der geforderten Drehzahl rotieren zu lassen. Es läßt sich nach der Gleichung

$$M_B = \frac{m \cdot r^2 \cdot \omega}{2} \quad \text{mit} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

berechnen. Überlegen Sie, welche Größen in welcher Weise Einfluß auf das Beschleunigungs-Drehmoment haben!

2. Spannungsabfall

Die Energieübertragungsanlage zwischen dem Kraftwerk und den Abnehmern der Elektroenergie kann vereinfachend als eine Reihenschaltung von Widerständen aufgefaßt werden (Bild 146/2). R_A ist der Widerstand der Energieabnehmer, R_L sind die Leitungswiderstände. Bei kurzen Leitungen mit ausreichenden Querschnitten wie z. B. in den Installationsanlagen eines Hauses oder einer Werkhalle sind die Leitungswiderstände so klein im Verhältnis zu den Verbraucherwiderständen, daß sie vernachlässigt werden können.

② Nimmt man zwischen Kraftwerk und Abnehmer eine Leiterlänge von 100 km bei einem Leiterdurchmesser von 50 mm an, dann ergeben sich mit

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (18)$$

Leitungswiderstände von 1,43 Ω bei Aluminiumleitungen. Obgleich dieser Widerstand klein ist, tritt an ihm ein erheblicher Spannungsabfall auf, denn der Widerstand der Abnehmer ist wesentlich kleiner.

Sind z. B. Abnehmer mit einer Leistung von 200 kW bei einer Spannung von 220 V angeschlossen, dann erhält man einen Widerstand nach der Gleichung

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (19)$$

von 0,24 Ω .

Entsprechend dem Ersatzschaltbild (Bild 146/2) liegt bei der Übertragungsanlage eine Reihenschaltung von $R_A = 0,24 \Omega$ und R_{L1} und R_{L2} mit je 1,43 Ω vor.

Die beiden Leitungswiderstände lassen sich zu einem Gesamtwiderstand $R_L = 2,86 \Omega$ zusammenfassen.

Nach den Gesetzen des unverzweigten Stromkreises verhalten sich die Teilspannungen wie die Teilwiderstände.

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2 \quad (20)$$

Auf das Ersatzschaltbild übertragen ergibt sich:

$$U_L : U_A = 2,86 \Omega : 0,24 \Omega$$

$$U_L : U_A = 12 : 1$$

Die Kraftwerkspannung wird also im Verhältnis 12:1 geteilt. Das ergibt für die Abnehmer eine Spannung von etwa 17 V und einen Spannungsabfall an der Leitung von 203 V. Obgleich in der Rechnung stark vereinfacht wurde, läßt das Ergebnis erkennen, daß die Abnehmer ihre elektrischen Geräte wegen der völlig unzureichenden Spannung nicht benutzen können.

③ Ein einfache Versuch zeigt die Richtigkeit der Überlegungen.

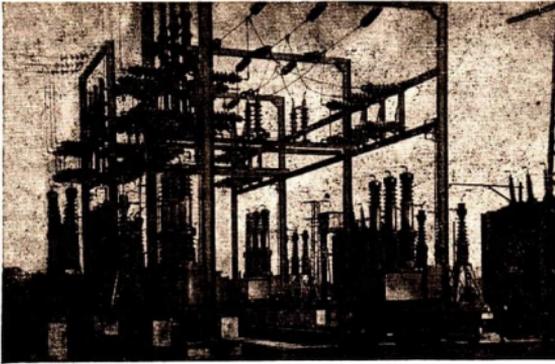
17 ▼ An eine Wechselspannungsquelle 12 V wird eine Lampe für 12 V mit einer Leistung von 10 W angeschlossen. Die Lampe leuchtet mit der erwarteten Helligkeit. ④

① Ermitteln Sie im Haushalt Ihrer Eltern, welche Leistung zum Betrieb aller Geräte maximal erforderlich ist und welche Leistung durchschnittlich benötigt wird!

② Berechnen Sie den Leitungswiderstand einer zweiadrigen Kupferleitung mit einem Querschnitt von 1,5 mm² für 20 m Übertragungsentfernung!

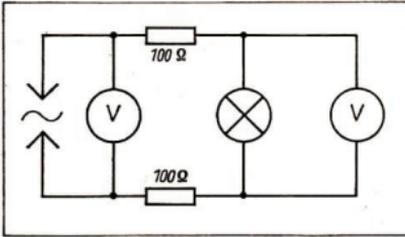
③ Welchen Warmwiderstand hat die im Versuch 17 verwendete Lampe? Der Warmwiderstand ist der bei leuchtender Lampe auftretende Widerstand. Er ist wesentlich größer als der Kaltwiderstand des Glühfadens. Erklären Sie diesen Unterschied!

④ Leiten Sie die Gleichung (19) aus den Grundgleichungen für die Widerstands- und Leistungsberechnung ab!



Werden in die Leitungen Widerstände von $100\ \Omega$ eingefügt, die etwa einer Übertragungsentfernung von 4 km bei einem Querschnitt von $0,75\ \text{mm}^2$ entsprechen, dann leuchtet die Lampe nicht mehr.

Mit einem Strommesser läßt sich nachweisen, daß noch immer Strom durch die Leitungen fließt. Er reicht jedoch nicht mehr aus, die Lampe zu betreiben (Bild 148/2).



Rechnung und Versuch beweisen die Notwendigkeit des Transportes der elektrischen Energie mit höheren Spannungen. Das erfordert Umspannwerke, deren wichtigste Teile Transformatoren sind (Bild 148/1).

148/2

Versuchsanordnung zum Spannungsabfall an Leitern

Transformatoren

Physikalische Grundlagen. Die Wirkungsweise des Transformators beruht auf der elektromagnetischen Induktion (↗ S. 115).

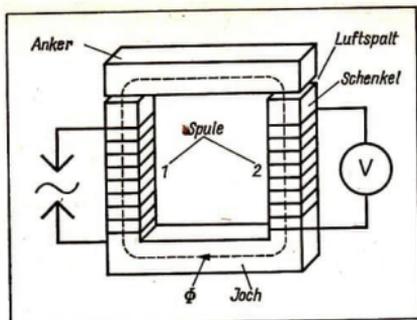
Fließt durch eine Spule ein Wechselstrom, dann wird um die Spule ein magnetisches Wechselfeld aufgebaut. Befindet sich eine zweite Spule in diesem Wechselfeld, dann läßt sich an ihr eine Spannung nachweisen (Bild 149/1).

Der durch die Spule 1 (Primärspule) fließende Strom ändert ständig seinen Betrag und seine Richtung, denn es ist ein Wechselstrom. ①

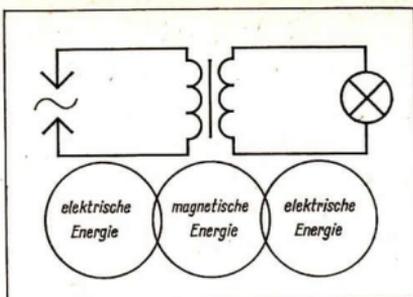
Diese Stromstärkeänderung ΔI hat eine Änderung $\Delta\Phi$ des die Spule durchsetzenden Magnetflusses Φ zur Folge.

Für Spule 2 bedeutet das, daß sie sich im Bereich eines veränderlichen Magnetfeldes befindet. Die Magnetflußänderung $\Delta\Phi$ bewirkt daher in Spule 2 (Sekundärspule) die Induktion einer Spannung, deren Betrag und Richtung von der Magnetflußänderung und damit von der Stromstärke in der Spule 1 abhängen. Aus der mathematischen Formulierung des Induktionsgesetzes

$$U_{\text{ind}} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (21)$$



149/1 Magnetischer Kreis eines Transformators



149/2 Energieübertragung an einem Transformator

ist abzulesen, daß die induzierte Spannung am Transformator abhängig ist von

- der Windungszahl N der Induktionsspule,
- der Stärke der Änderung des magnetischen Flusses, die eine Funktion der Stromstärkeänderung in der Primärspule ist,
- der Geschwindigkeit der Änderung des Magnetflusses, die von der Frequenz des Primärstromes abhängt. ②

Die zuletzt genannte Abhängigkeit ist im allgemeinen uninteressant, da meistens mit einer Frequenz von 50 Hz gearbeitet wird. Damit die Sekundärspule vom größten Teil des magnetischen Flusses der Primärspule durchsetzt wird, erhielten im Versuch beide Spulen eine gemeinsamen Eisenkern, dessen Hauptteile Joch, Schenkel und Anker bilden (Bild 149/1).

Die Schenkel tragen die Wicklungen. Joch und Anker werden im allgemeinen nicht bewickelt.

Die vom magnetischen Wechselfeld übertragene Elektroenergie reicht aus, auf der Sekundärseite eine Glühlampe zu betreiben.

Transformatoren ermöglichen die Übertragung elektrischer Energie von einem Stromkreis auf einen zweiten Stromkreis ohne leitende elektrische Verbindung zwischen den Stromkreisen. Der Mittler ist die Energie des magnetischen Feldes.

Transformatoren sind Wandler in dreifacher Hinsicht.

1. Transformatoren wandeln niedrige Spannungen in höhere oder hohe Spannungen in niedrigere. Diese Eigenschaft spielt vor allem bei der Übertragung der Elektroenergie eine Rolle.
2. Transformatoren wandeln niedrige Stromstärken in höhere und hohe Stromstärken in niedrige um.

Man nutzt diese Eigenschaft bei Meßwandlern und in der Stromwärmetechnik.

- ① Warum ist es nicht möglich, Transformatoren mit Gleichstrom zu betreiben?
- ② Informieren Sie sich im Lehrbuch Physik Kl. 9 über die Größen, von denen die Höhe der Induktionsspannung abhängig ist!

3. Transformatoren wandeln niedrige Widerstände in höhere und hohe Widerstände in niedrige um.

Von dieser Eigenschaft der Transformatoren macht vor allem die Informations-elektrik Gebrauch, um die Ein- und Ausgangswiderstände von Baugruppen und Bauelementen den jeweiligen Bedingungen anzupassen.

Der ideale Transformator

Bei den folgenden Untersuchungen der Gesetzmäßigkeiten am Transformator muß beachtet werden, daß die zu ermittelnden Ergebnisse nur unter folgenden idealisier-ten Bedingungen streng gültig sind:

1. Der Magnetfluß muß in der Primär- und der Sekundärspule vollkommen gleich sein.
2. Der Transformator muß verlustlos arbeiten.

Spannungsübersetzung. Die Spannungsübersetzung wird am unbelasteten Transfor-mator im Leerlauf untersucht.

Ein Transformator wird über ein Potentiometer an die Wechselspannungsquelle angeschlossen. Die Primärspannung wird am Eingang des Transformators und die Sekundärspannung am Ausgang des Transformators gemessen. Damit die Bedingung des offenen, unbelasteten Sekundärkreises weitgehend erfüllt ist, soll das Meßgerät an der Sekundärspule einen hohen Innenwiderstand haben. Wird die Primärspannung mit Hilfe des Potentiometers verändert, ist auch eine Änderung der Sekundärspannung zu beobachten (Bild 150/1).

Die Sekundärspannung U_2 ist eine Funktion der Primärspannung U_1 .

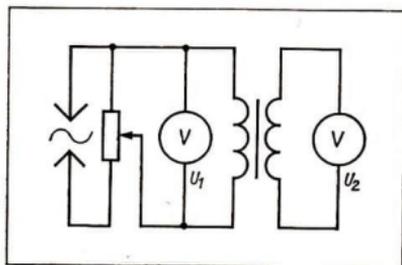
$$U_2 = f(U_1) \quad (22)$$

Nach dem Induktionsgesetz (Gleichung 21) kann die Spannung U_2 auch so beschrie-ben werden:

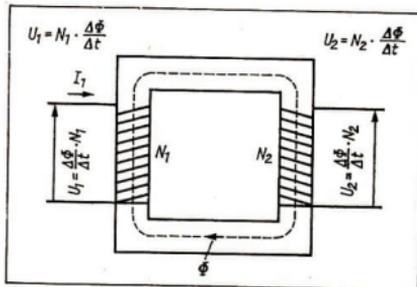
$$U_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (23)$$

Eine Induktionsspannung tritt aber nicht nur in der Sekundärspule auf. Infolge der Selbstinduktion der Primärspule wird auch an ihr eine Spannung induziert, die im Fall des idealen, verlustlos arbeitenden Transformators der angelegten Spannung gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist. ①

150/1 Primär- und Sekundärspannung am Transformator



150/2 Induktionsspannungen am Transformator



Auch der Betrag der Selbstinduktionsspannung ist abhängig von der Windungszahl der Spule und der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses (Bild 150/2). Für die Primärspannung U_1 läßt sich also schreiben

$$U_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (24)$$

Werden (23) und (24) nach $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ aufgelöst, dann ergibt sich:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{U_1}{N_1} \quad (25) \quad \text{und} \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{U_2}{N_2} \quad (26)$$

Wenn vorausgesetzt wird, daß der Magnetfluß und seine Änderungsgeschwindigkeit in beiden Spulen gleich sind, lassen sich (25) und (26) gleichsetzen.

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \quad (27)$$

Multiplikation der Gleichung (27) mit $\frac{N_1}{U_2}$ führt zur Spannungsübersetzung des Transformators.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (28)$$

20

Überprüfen Sie das Ergebnis der theoretischen Ableitung der Spannungsübersetzung experimentell nach PSV 9, V 2.2.5.!

②

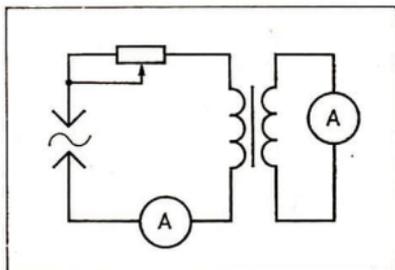
Am Transformator verhalten sich Primärspannung und Sekundärspannung wie die entsprechenden Windungszahlen.

Sollen also Spannungen herauftransformiert werden, dann muß die Sekundärspule eine größere Windungszahl haben als die Primärspule. Sollen dagegen Spannungen herabtransformiert werden, dann muß die Primärspule die größere Windungszahl haben.

Stromstärkeübersetzung. Die Stromstärkeübersetzung wird unter der angenommenen Bedingung untersucht, daß der Transformator die Energie verlustlos überträgt.

Die Primärspule eines Transformators wird über einen veränderlichen Widerstand an die Wechselspannungsquelle angeschlossen, die Sekundärwicklung wird durch einen Strommesser kurzgeschlossen.

21



151/1 Stromübersetzung am Transformator

① Erklären Sie das Zustandekommen der Selbstinduktion!

② Ein Transformator mit einer Nennleistung von 10 kVA hat eine Primärspannung von 380 V. Die Windungszahlen betragen primär 980 Windungen und sekundär 594. Welche Sekundärspannung liefert der Trafo?

Verändert man im Primärstromkreis die Stromstärke, dann ändert sich auch in der Sekundärspule die Stromstärke (Bild 151/1). Unter der Bedingung verlustloser Energieübertragung kann die vom Transformator aufgenommene Leistung der abgegebenen gleichgesetzt werden.

$$U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (29)$$

Vereinfachend wird angenommen, daß die Leistungsfaktoren der Primär- und der Sekundärseite gleich sind. Dann wird aus Gleichung (29)

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (30)$$

und durch Umstellung

$$U_1 : U_2 = I_2 : I_1 \quad (31)$$

Da sich entsprechend Gleichung (28) die Spannungen wie die Windungszahlen verhalten, läßt sich (31) auch schreiben:

$$N_1 : N_2 = I_2 : I_1 \quad (32)$$

Gleichung (32) drückt das Stromstärke-Übersetzungsverhältnis am Transformator aus.

Die Stromstärken am Transformator stehen im umgekehrten Verhältnis wie die Windungszahlen.

22

▼ Untersuchen Sie die Stromstärkeübersetzung nach PSV 9, V 2.2.5.1

①

Der reale Transformator

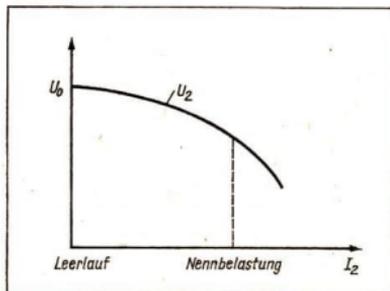
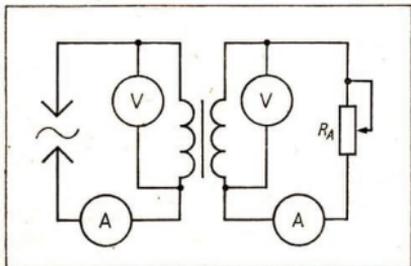
Klingeltransformatoren arbeiten fast ständig im Leerlauf, nur während der kurzen Zeiten der Benutzung der Klingel sind sie belastet. Dennoch kann man bei Berührung des Transformators eine geringfügige Erwärmung feststellen.

Sie ist auf den auch im Leerlauf fließenden Strom in der Primärspule zurückzuführen. Man bezeichnet diesen Strom als Leerlaufstrom. Er wird vor allem vom ohmschen Widerstand der Spule und durch den Aufbau des Wechselfeldes verursacht.

Spannung und Stromstärke am realen Transformator. Hierzu soll folgendes Experiment durchgeführt werden.

152/2 Sekundärspannung in Abhängigkeit von der Belastung

152/1 Messungen am belasteten Transformator



An einem Transformator werden Spannung und Stromstärke im Primärkreis bei offener Sekundärspule gemessen. Nach dem Schließen des Sekundärkreises über einen veränderlichen Widerstand werden Spannung und Stromstärke in beiden Stromkreisen bei unterschiedlichen Belastungen gemessen (Bild 152/1). Die geringe Primärstromstärke bei offener Sekundärwicklung erhöht sich beträchtlich, sobald die Sekundärspule belastet wird.

Die einfachste Erklärung für die Erhöhung der Primärstromstärke liefert der Energieerhaltungssatz. Wird der Sekundärkreis geschlossen, dann wird an dem äußeren Widerstand eine Arbeit verrichtet, indem z. B. elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Die dabei umgesetzte elektrische Energie muß jedoch dem Primärstromkreis zugeführt werden. Da die Spannung an der Primärspule konstant bleibt, kann die zusätzliche Energie nur durch Erhöhung der Stromstärke aufgebracht werden.

Durch die Primärspule fließt bei Belastung außer dem Leerlaufstrom ein zusätzlicher Strom, dessen Betrag der sekundären Belastung entspricht.

Versuch 23 zeigt auch, daß die Gesetzmäßigkeit der Spannungsübersetzung nur bei gering belastetem Transformator und die Stromstärkeübersetzung nur bei stark belastetem Transformator mit ausreichender Genauigkeit gültig ist.

Bei der Untersuchung der Spannungs- und Stromstärkeübersetzung wurden diese Einschränkungen berücksichtigt.

Untersuchen Sie Spannungs- und Stromstärkeübersetzung am belasteten Transformator nach PSV 9, V 2.2.6.!

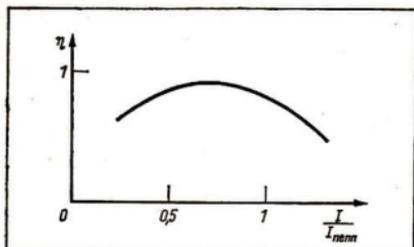
Bei belastetem Transformator sinkt die Sekundärspannung unter den Wert der Leerlaufspannung. Die Spannung sinkt umso stärker, je höher der Transformator belastet wird (Bild 152/2).

Wirkungsgrad am realen Transformator. Es ist aus den bisherigen Darlegungen bereits klar geworden, daß die verlustlose Energieübertragung am idealen Transformator nur eine Modellvorstellung ist. Am realen Transformator treten Verluste auf, die von den ohmschen Widerständen der Spulen, den Blindwiderständen der Wicklungen und den Magnetisierungs- und Wirbelstromverlusten des Eisenkerns verursacht werden.

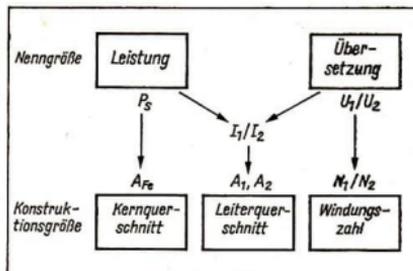
Ein Klingeltransformator wird sekundärseitig mit einem veränderlichen Widerstand belastet. Bei unterschiedlichen Werten des Belastungswiderstandes werden die Leistung im Primärkreis, im Sekundärkreis und die Sekundärstromstärke gemessen. An Hand der gemessenen Leistungen werden die zu den stufenweise veränderten Sekundärstromstärken gehörigen Wirkungsgrade errechnet und in Abhängigkeit von der Stromstärke grafisch dargestellt (Bild 154/1).

Wurde im Versuch 25 ein Transformator mit bekannter Nennleistung benutzt, dann erkennt man, daß der Wirkungsgrad unterhalb der Nennbelastung des Transformators am größten ist. Es ist deshalb ökonomisch sinnvoll, Transformatoren immer so zu betreiben, daß sie auch bei schwankender Belastung möglichst ständig im Bereich des maximalen Wirkungsgrades arbeiten. Die Verluste am Transformator hängen nicht nur von seiner Belastung ab, sie werden wesentlich schon bei der Konstruktion des Transformators bestimmt. Entsprechend der geforderten Leistung müssen die Querschnitte des Eisenkerns bemessen werden, Spannung und Stromstärke bestimmen die Windungszahlen und die Drahtquerschnitte (Bild 154/2).

- ① Ein Transformator mit einer Nennleistung von 5 kVA habe eine Übersetzung von 500 V/230 V. Berechnen Sie die Stromstärken!



154/1 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastung



154/2 Nenngrößen und Konstruktionsgrößen

Außerdem haben Material und Form des Eisenkerns Einfluß auf den magnetischen Fluß, und Leitermaterial und Wicklungsart beeinflussen die thermische Beanspruchung des Transformators.

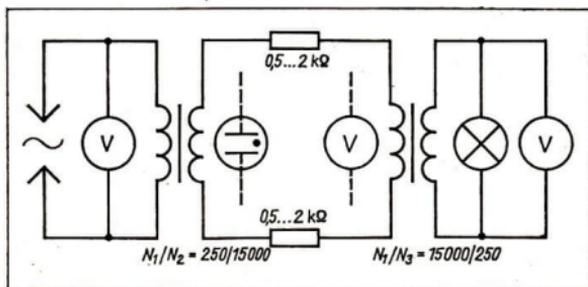
Anwendung von Transformatoren

Transformatoren haben ein so weites Anwendungsgebiet und werden nach derart vielen Unterscheidungsmerkmalen eingeteilt, daß es schwierig ist, sie in einem übersichtlichen Schema darzustellen. Deshalb werden aus der Vielzahl der Transformatoren nur einige wenige Haupt- und Sonderanwendungen herausgegriffen.

Leistungstransformatoren—Umspanner. Im Versuch 17 wurde gezeigt, daß der Transport der Elektroenergie nur dann wirtschaftlich ist, wenn die Energie bei sehr hohen Spannungen übertragen wird. Aus dem Blockschaltplan der Energieübertragung (Bild 146/1) geht hervor, daß die elektrische Energie entsprechend der Übertragungsentfernung mehrfach herauf- und herabtransformiert wird.

26

Ähnlich Versuch 17 wird eine Energieübertragungsanlage aufgebaut, die als Ersatz für die großen Leitungslängen zwei Widerstände enthält. Am Anfang der Übertragungsleitung wird die Spannung von einem Aufwärtstransformator mit dem Übersetzungsverhältnis der Primär- zur Sekundärwindungszahl von etwa 125 zu 15000 herauftransformiert, am Ende der Übertragungsleitung wird die Spannung von einem Abwärtstransformator wieder auf den Betrag der Primärspannung am Anfang der Leitung gebracht. Die Widerstände, die die Freileitung simulieren, können zwischen 0,5 und 2 kΩ liegen (Bild 154/3).



154/3
Modell einer
Fernübertragung
mit Transformatoren

Im Gegensatz zu Versuch 17 leuchtet die Lampe am Ende der Fernleitung mit voller Helligkeit. Das Auf- und Abspannen bei der Fernübertragung erfolgt aus netztechnischen und hinsichtlich des Transformators konstruktionsbedingten Gründen stufenweise. Die Leistungen der Transformatoren richten sich nach den jeweiligen Erfordernissen der Versorgungsgebiete. In großen Umspannwerken werden Transformatoren mit Nennleistungen bis zu 250 MVA eingesetzt. In den Ortsnetzen werden je nach der Größe der Dörfer oder Städte Transformatoren mit Leistungen zwischen 100 kVA und 630 kVA verwendet.

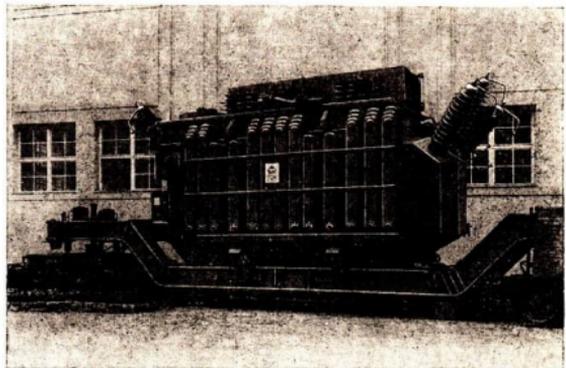
An einem Transformator für 20 kV Primärspannung und 400 V Sekundärspannung bei einer Nennleistung von 250 kVA muß mit Verlustleistungen von 5 bis 6 kW gerechnet werden. Da diese Leistung fast ausschließlich in Wärmeenergie umgesetzt wird, benötigt der Transformator eine leistungsfähige Kühleinrichtung. Bei den meisten Leistungstransformatoren wird zur Kühlung Öl verwendet, das den Transformator mantelförmig in einem Kühlgehäuse umgibt und in einem Ölkühler die dem Transformator entzogene Wärme an die Luft abgibt (Bild 155/1).

Um eine Vorstellung von den Ausmaßen eines mittleren Netztransformators eines Umspannwerkes zu vermitteln, werden nachstehend die wichtigsten Daten des Transformators KDRF 63001/110 genannt.

Übersetzung	110 kV/31,5 kV	Abmessungen	
Leistung	63 MVA	Länge	6100 mm
Frequenz	50 Hz	Breite	2950 mm
Leerlaufverluste	59 kW	Höhe	6200 mm
Kurzschlußverluste	250 kW	Ölfüllung	20,5 t
Kühlungsart	Ölumlauf durch Pumpe, Ölkühlung mit Wasser	Gesamtmasse	84,5 t

②

Allein die Leerlaufverluste dieses Transformators würden ausreichen, kleine Ortschaften mit Elektroenergie zu versorgen.



155/1
Drehstrom-Öl-Transformator

- ① Warum wird zur Kühlung von Transformatoren nicht das gegenüber dem Öl viel billigere Kühlmittel Wasser verwendet?
- ② Berechnen Sie für den Transformator KDRF 63001/110 den Wirkungsgrad bei einer Belastung von 55 MW und die Nennstromaufnahme!

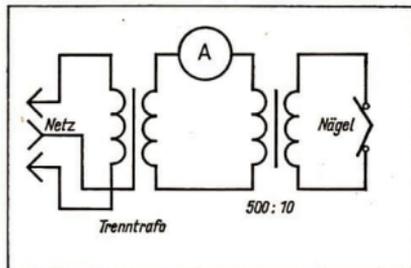
Trenntransformatoren. Transformatoren mit dem Übersetzungsverhältnis 1:1 sind Trenntransformatoren. Sie können also weder die Spannung noch die Stromstärke verringern oder vergrößern. Trenntransformatoren haben die Aufgabe, die Netzspannung erdfrei zu machen, d. h., die leitende Verbindung des N-Leiters mit der Erde sekundärseitig aufzuheben. ①

Diese Schutztrennung verhindert das Auftreten von Berührungsspannungen zwischen nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden Metallteilen und der Erde. An solche Trenntransformatoren darf nur ein Gerät angeschlossen werden.

Hochstromtransformatoren. Um einem Transformator hohe Ströme entnehmen zu können, muß er primärseitig mehr Windungen haben als sekundärseitig.

27

Ein Transformator mit dem Übersetzungsverhältnis $N_1:N_2 = 750:10$ wird über einen Trenntransformator an die Netzspannung angeschlossen. Die Sekundärspule wird durch einen Nagel kurzgeschlossen (Bild 156/1).



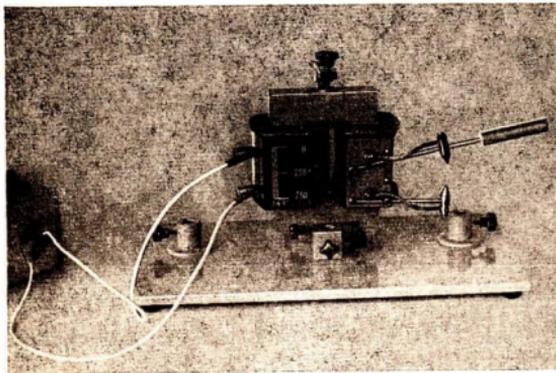
156/1 Schaltplan des Versuchs zum Glühen eines Nagels

Schon nach kurzer Zeit beginnt der Nagel zu glühen und schmilzt unter Umständen. Die durch Messung ermittelte Primärstromstärke würde bei weitem nicht ausreichen, den Nagel derart stark zu erwärmen. Aus der gemessenen Primärstromstärke läßt sich der Strom durch den Nagel näherungsweise berechnen. Eine genaue Berechnung ist nicht möglich, da am Transformator infolge seines einfachen Aufbaus erhebliche Verluste auftreten.

Technische Anwendung findet diese Stromtransformation u. a. beim elektrischen Schweißen.

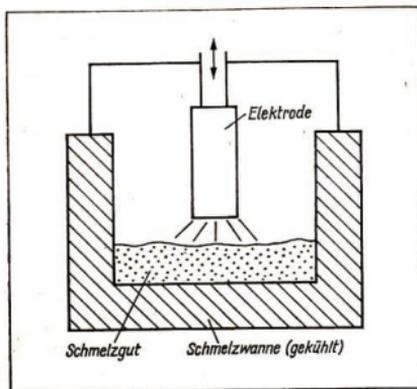
28

Die Sekundärspule des Transformators mit dem Übersetzungsverhältnis 750:10 wird mit dem Modell einer Schweißzange versehen. Die Netzspannung wird dem Transformator über einen Trenntransformator zugeführt. Nach dem Einschalten der Spannung werden zwei Eisenbleche (Stärke $< 0,5$ mm) in der Schweißzange unter leichtem Druck verschweißt (Bild 156/2).



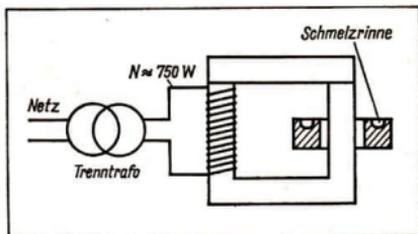
156/2 Modell eines Schweißtransformators

Der Strom durch die Sekundärspule hat eine solche Stärke, daß das Eisen glüht und an der punktförmigen Berührungsstelle der beiden Bleche sogar schmilzt. Nach dem Erstarren der Schmelzstellen sind die Bleche fest miteinander verbunden, verschweißt. Anwendung findet dieses Verfahren beim Lichtbogenschweißen. Die beim Lichtbogenschweißen (oft auch als elektrisches Schweißen bezeichnet) erforderlichen Stromstärken betragen 50 A bis 1500 A je nach der Stärke des zu verschweißenden Materials. Noch höhere Sekundärströme als von Schweißtransformatoren werden von **Ofentransformatoren** verlangt. Diese Transformatoren dienen der Energieversorgung der Lichtbogenöfen in Stahlwerken, bei der Aluminiumgewinnung, in der Karbidproduktion und an vielen anderen Stellen. Zwischen einer Abschmelzelektrode und dem Schmelzgut wird durch kurze Berührung ein Lichtbogen gezündet. Nach dem Zünden brennt zwischen der Abschmelzelektrode und dem Schmelzgut ein Lichtbogen, in dem Temperaturen zwischen 5000 K und 20000 K erreicht werden (Bild 157/1).



157/1 Prinzip des Lichtbogenofens

157/2
Modellversuch zur Induktionserwärmung



Die Ofentransformatoren werden meistens direkt an das Hochspannungsnetz angeschlossen und liefern sekundär bei Spannungen zwischen 70 V und 700 V Stromstärken bis zu 150000 A.

Häufige Anwendung finden Hochstromtransformatoren bei der Induktionserwärmung, die mit nieder-, mittel- oder hochfrequentem Wechselstrom arbeitet.

Auf einem geschlossenen U-Kern befindet sich primärseitig eine Spule mit 1500 Windungen und sekundärseitig eine mit Bleistücken (Zinn) gefüllte Schmelzrinne. Die Primärspule wird über einen Trenntransformator an die Netzspannung angeschlossen, ein Amperemeter ermöglicht das Messen des Primärstroms (Bild 157/2).

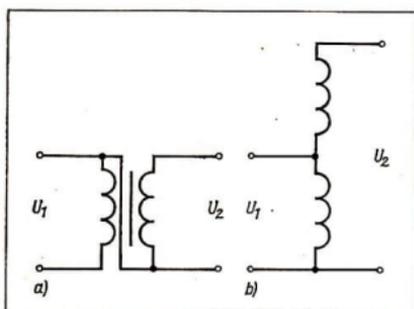
Wird der Primärstromkreis geschlossen, dann beginnt nach kurzer Zeit das Metall in der Schmelzrinne zu schmelzen. Die Sekundärstromstärke läßt sich näherungsweise aus der Kenntnis des Primärstroms und des Übersetzungsverhältnisses berechnen. Die Induktionserwärmung ist vorteilhaft gegenüber anderen Verfahren.

1. Die Erwärmung der Werkstücke erfolgt gezielt nur an der vorbestimmten Stelle und bis zu bestimmten Eindringtiefen. Das macht die Induktionserwärmung z. B. bei der Oberflächenhärtung unentbehrlich. ②

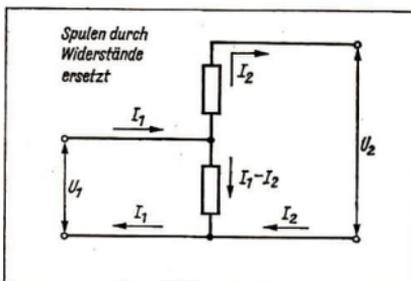
- ① Erläutern Sie die Gefährlichkeit der Berührung des L-Leiters bei geerdetem N-Leiter!
- ② Bei welchen Teilen Ihres Mopeds erwarten Sie, daß diese oberflächenhart sind? Begründen Sie Ihre Entscheidung!

- Die Schmelzvorgänge erfolgen mit großer Sauberkeit und können unter Schutzgasen stattfinden. Das ermöglicht das Schmelzen von Metallen zum Zwecke der Reinigung bis zu hohen Reinheitsgraden.
- Die Induktionserwärmung arbeitet mit sehr kurzen Aufheizzeiten. Aufheißgeschwindigkeiten von 1000 K/s und die gute Dosierbarkeit der Wärmeabgabe ermöglichen den Einsatz der Induktionserwärmung in automatisierten Produktionsprozessen.

Spartransformatoren. Nach der Art, wie Transformatoren die Leistung übertragen, werden **Voll-** und **Spartransformatoren** unterschieden. Volltransformatoren übertragen die gesamte Leistung induktiv, sie haben galvanisch getrennte Wicklungen. Spartransformatoren übertragen nur einen Teil der Energie induktiv, der andere Teil wird leitend übertragen. Beim Spartransformator sind praktisch die Primär- und die Sekundärwicklung in Reihe geschaltet, und die Spannungszufuhr und -abnahme erfolgt über einen gemeinsamen Leiter. Bild 158/1 zeigt zwei Möglichkeiten der Schaltung. Am Spartransformator wird der Primärstrom an der Wicklungsanzapfung geteilt.



158/1 Transformator in Sparschaltung
 a) Darstellung mit gemeinsamem Eisenkern
 b) Darstellung mit getrennten Spulen

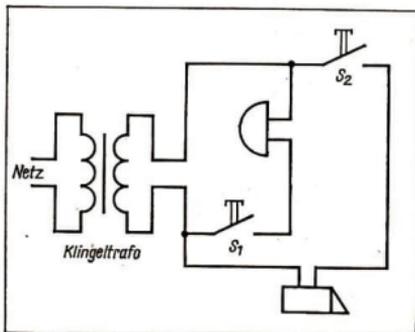
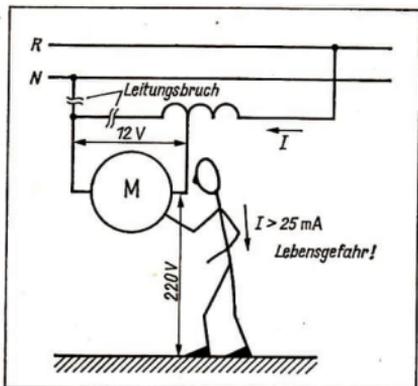


158/2 Stromteilung am Spartransformator

Durch die beiden Wicklungsteile fließt also ein kleinerer Strom als beim Volltransformator durch die Primärwicklung – gleiche Leistungen vorausgesetzt (Bild 158/2). Das führte zur Bezeichnung Spartransformator.

Beim Spartransformator können bei gleicher Leistung wie am Volltransformator geringere Drahtquerschnitte und kleinere Kerne verwendet werden.

Wenn trotzdem nicht alle Transformatoren in Sparschaltung betrieben werden, so liegt das vor allem daran, daß Spartransformatoren nicht so kurzschlußfest wie Volltransformatoren sind und bei Schäden am Transformator die Primärspannung auf die Sekundärseite gelangt. Aus diesem Grund dürfen z. B. Schutztransformatoren nicht in Sparschaltung ausgeführt werden. Tritt beispielsweise bei einem Transformator für Schutzkleinspannung (Klingel- oder Spielzeugtransformator) ein Leitungsbruch in der Wicklung oder in der Zuleitung auf, dann liegt u. U. die volle Netzspannung an dem mit Kleinspannung zu betreibenden Gerät. Das braucht nicht zu einer Zerstörung des Gerätes zu führen, wird jedoch äußerst gefährlich für den Benutzer



159/1
Berührungsspannung am Spartransformator

159/2
Schaltplan einer Klingel- und Türöffneranlage

dieses Gerätes, der sich auf die Unschädlichkeit der Kleinspannung verläßt und spannungsführende Teile berührt.

Über die Erde steht er dann unter einer Spannung von 220 V, und das bedeutet Lebensgefahr (Bild 159/1). ^①

Die Verwendung von Spartransformatoren zur Gewinnung von Schutzkleinspannung ist verboten.

Kleintransformatoren. Unter dieser Bezeichnung werden alle Transformatoren mit einer Sekundärleistung unter 6,3 kVA zusammengefaßt. Ihr Anwendungsgebiet reicht vom Übertrager in Transistorgeräten über Klingel- und Spielzeugtransformatoren bis zum Schweißtransformator für Heimwerker. Aus der Vielzahl der Kleintransformatoren werden im folgenden einige Sonderanwendungen ausgewählt und kurz beschrieben.

Übertrager finden wir in vielen Geräten der Unterhaltungselektronik. Sie haben vor allem die Aufgabe, die Ein- und Ausgangswiderstände von Transistorstufen untereinander oder gegenüber anderen Baugruppen anzupassen. Auch die Fernsprechtechnik benutzt Übertrager in ihren Anlagen zur Verbesserung der Übertragungsqualitäten.

Klingeltransformator ist die Sammelbezeichnung für Transformatoren, die sekundärseitig Spannungen zwischen 6 und 18 V abgeben. In der Regel sind Klingeltransformatoren als Trenntransformatoren ausgeführt. Durch sekundärseitige Wicklungsanzapfungen ist meistens die Abnahme mehrerer Sekundärspannungen möglich. ^②

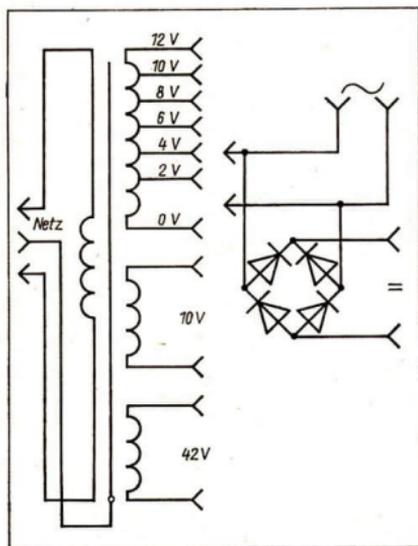
Mit Klingeltransformatoren lassen sich nicht nur die Klingelanlagen eines Hauses betreiben, sie liefern auch die elektrische Energie für die elektromagnetischen Türöffner, versorgen über Gleichrichterschaltungen Sprechanlagen zwischen Haustür und Woh-

① Begründen Sie die Ungefährlichkeit der Schutzkleinspannung für den Menschen!

② Warum wird bei Transformatoren der Spannungsstellung durch Anzapfung der Wicklungen der Vorzug vor der Spannungsveränderung durch Widerstände gegeben?

nung und stellen die Steuerspannung für Installationsfernswitchungen bereit (Bild 159/2).

Stromversorgungsgeräte werden im Schulunterricht ebenso benötigt wie zum erdfreien Netzbetrieb von Radios, Tonbandgeräten und elektromagnetischem Spielzeug oder zum Laden der Akkumulatorenbatterien der Kraftfahrzeuge. Das Kernstück von Stromversorgungsgeräten sind Transformatoren, die meistens mehrere Sekundär-



160/1
Vereinfachte Schaltung
eines Stromversorgungsgerätes
für Schülerexperimente

wicklungen oder angezapfte Sekundärwicklungen haben. Da für viele Anwendungsfälle neben der niedrigen Wechselspannung auch Gleichspannung benötigt wird, enthalten Stromversorgungsgeräte außer dem Transformator eine Gleichrichterschaltung (Bild 160/1).

Obgleich heute die Möglichkeit besteht, mit Hilfe von Halbleiterbauelementen und Widerstands-Kondensator-Kombinationen auch geringe Gleichspannungen ohne Transformator (eisenlos) aus dem Netz zu gewinnen, gibt man dennoch dem Transformator und der anschließenden Gleichrichtung den Vorzug. ①

Der Grund ist die weitgehende Sicherheit gegen Unfälle an der Netzspannung, denn die Transformatoren der Stromversorgungsgeräte werden fast ausnahmslos als Trenntransformatoren ausgeführt (↗ S. 156).

Stelltransformatoren werden u. a. benutzt, um bei stark schwankender Netzspannung die Betriebsspannung für Fernsehgeräte und andere stark spannungsempfindliche Geräte auf dem vorgeschriebenen Wert zu halten. Stelltransformatoren arbeiten vorwiegend nach zwei Wirkprinzipien:

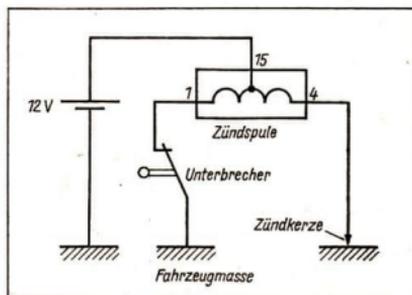
1. Primär- und Sekundärwicklung einschließlich der sie tragenden Eisenkerne sind gegeneinander beweglich. Durch die Verstellung der Wicklungen zueinander wird der magnetische Fluß durch die Wicklungen verändert und so Einfluß auf das Übersetzungsverhältnis genommen. Diese Form findet vor allem bei großen Stelltransformatoren in den Umspannwerken Anwendung.

2. Die Sekundärwicklung wird so ausgeführt, daß an ihrer äußersten Wicklungslage ein Schleifkontakt über die blanken Drähte geführt werden kann. Dadurch kann die Windungszahl der Sekundärspule und damit die Sekundärspannung kontinuierlich verändert werden.

Zündspule an Kraftfahrzeugen. Zur Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches benötigen Otto-Motoren Zündspannungen zwischen 10 kV und 35 kV. Die Bereitstellung dieser Spannung aus dem 6 V- oder 12 V-Bordnetz des Kraftfahrzeugs übernimmt die Zündanlage, deren Hauptbestandteile der Unterbrecher, die Zündspule und die Zündkerze sind.

Der Unterbrecher ist ein Schalter, der von einem Schaltnocken immer dann geöffnet wird, wenn ein Kolben des Motors das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet hat. Das Öffnen des Unterbrechers unterbricht den Primärstromkreis der Zündspule. Die Folge ist das Zusammenbrechen des Magnetfeldes der Primärwicklung. Die plötzliche Änderung des magnetischen Flusses im gemeinsamen Eisenkern der Primär- und der Sekundärwicklung induziert in letzterer eine Spannung, die entsprechend dem hohen Übersetzungsverhältnis der Wicklungen Werte bis zu 35 kV annehmen kann (Bild 161/1).

161/1
Schaltplan der Zündanlage
eines Kraftfahrzeuges



In einer Schaltung nach Bild 161/1 wird der Unterbrecher durch einen Austaster ersetzt. Die Verbindung der Zündspule mit der Zündkerze muß durch stark isoliertes Zündkabel erfolgen, damit der Funke nicht schon vor der Zündkerze überspringt. Bei jeder Betätigung des Austasters springt an der Zündkerze ein Funke über. Dieses Modell einer Zündanlage wird noch wirklichkeitsgetreuer, wenn die Unterbrechung des Primärstromkreises durch den Öffner eines Relais erfolgt und das Relais von einem astabilen Multivibrator gesteuert wird. Astabile Multivibratoren lassen sich u. a. mit dem Baukasten Elektronik V aufbauen oder von einer AG(R) Elektronik ausleihen.

Die Spannungstransformation in der Zündspule ist keine Wechselstromtransformation. Die Primärspule wird nicht von einem Wechselstrom, sondern von einem zerhackten Gleichstrom durchflossen, der seine Richtung nicht ändert.

Von der Möglichkeit, zerhackten Gleichstrom auf hohe Spannungswerte zu transformieren, macht man auch beim Weidezaungerät Gebrauch.

Mechanische Zerhacker sorgen dafür, daß ein Gleichstrom periodisch unterbrochen und von einem Hochspannungstransformator aufgespannt wird. Die Berührung der auf diese Weise gewonnenen Hochspannungen ist zwar unangenehm — beim Weidezaungerät beruht darauf die Wirksamkeit — doch völlig ungefährlich.

① Informieren Sie sich in der technischen Beschreibung oder im Schaltplan Ihres Radios oder Tonbandgerätes über die Gewinnung der Versorgungsspannung für die Transistorstufen!

Zusammenfassung

Transformatoren sind elektrische Maschinen, die die Energieart nicht verändern. Sie wandeln aufgrund der elektromagnetischen Induktion an Spulen im veränderlichen Magnetfeld die Spannung und die Stromstärke der zugeführten elektrischen Energie. Dabei geht stets Energie der Nutzung verloren, weil durch Widerstandserwärmung und Ummagnetisierung der Eisenkerne elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird.

Verbundbetrieb und Perspektiven der Fernübertragung elektrischer Energie

Verbundbetrieb. Der Wirkungsgrad großer elektrischer Maschinen ist größer als bei kleinen Maschinen. Deshalb werden möglichst große Kraftwerksaggregate gebaut. Die damit erzeugte Elektroenergie kann auf ein größeres Territorium verteilt werden. Das führte zur Entwicklung nationaler Verbundnetze. Es zeigte sich bald, daß Verbundsysteme ihre Aufgaben um so besser erfüllen können, je ausgedehnter sie sind, denn in großen Netzen sind ①

- Spitzen- und Minimalbedarf auch in weit voneinander entfernten Gebieten leicht auszugleichen,
- Störungen in der Erzeugung besser zu kompensieren,
- Generalreparaturen aufeinander abstimmbare bei Erhaltung der vollen Leistungsfähigkeit des Netzes,
- Leistungsreserven einfacher bereitzuhalten.

Diese Vorteile führten dazu, daß heute zwischen den Ländern des RGW das größte internationale Verbundsystem der Erde existiert. Die Steuerung solcher Verbundsysteme erfolgt über Dispatcherzentralen.

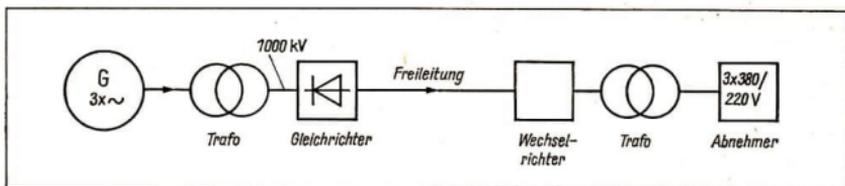
Voraussetzung für den Verbundbetrieb ist, daß alle im Netz arbeitenden Generatoren synchron geschaltet sind. Dieser Zustand ist erreicht, wenn alle Maschinen Wechselspannung der gleichen Frequenz und Spannung liefern. Zu diesem Zweck sind in den Kraftwerken entsprechende Meß- und Regeleinrichtungen erforderlich.

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Wenn die Übertragung der Elektroenergie über große Entfernungen mit hohen Spannungen wirtschaftlicher ist als mit niedrigen Spannungen, dann liegt die Frage nahe, warum die Übertragung nicht mit noch höheren Spannungen als 380 kV erfolgt.

In der UdSSR wurden zur Überbrückung der großen Entfernungen in diesem Land bereits Spannungen von 500 kV mit Erfolg eingesetzt. Seit Jahren laufen auch Untersuchungen, mit noch höheren Übertragungsspannungen zu arbeiten. Der technischen Anwendung von Spannungen über 380 bzw. 500 kV sind jedoch Grenzen gesetzt, die vor allem bedingt sind durch

- Isolations- und Erdschlußprobleme,
- den erhöhten Aufwand in den Umspannwerken,
- die Verluste infolge von Entladungserscheinungen an den Leitungen, die von Leuchterscheinungen begleitet sind.

Um die Probleme der Wechselstromübertragung zu umgehen, wird seit einigen Jahren versucht, elektrische Energie mit hochgespanntem Gleichstrom zu übertragen. Die Erzeugung und Verteilung der Elektroenergie erfolgt auch bei der Hochspannungs-



163/1 Prinzip der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Gleichstrom-Übertragung über Drehstrom. Vom Generator des Kraftwerkes wird der Drehstrom Aufwärtstransformatoren zugeführt, die ihn auf Spannungen um 1000 kV transformieren. Der Aufspannung folgt eine Gleichrichtung des Wechselstroms. Am Ende der Hochspannungsübertragung muß der Gleichstrom in Wechselrichtern wieder in Wechselstrom umgewandelt und abgespannt werden (Bild 163/1).

Beim heutigen Stand der Technik werden Gleichstromübertragungen erst bei Entfernungen über 500 km wirtschaftlich sinnvoll.

Supraleitung. Möglichkeiten, die Übertragung der Elektroenergie ökonomischer zu gestalten, könnten künftig in der Nutzung der Supraleitung, der Mikrowellen und der Laserstrahlen liegen. Unter der Supraleitung versteht man die völlig widerstandsfreie Leitfähigkeit bestimmter Leiter unterhalb der Temperatur 20 K. Das Erreichen dieses supraleitenden Zustandes ist heute noch an die Bedingung der Kühlung unter die sog. Sprungtemperatur zwischen 10 und 20 K gebunden. Deshalb müssen Anlagen zur Nutzung der Supraleitung mit sehr aufwendigen Kühlanlagen verbunden sein. Noch geringer erscheinen die Chancen, elektrische Energie in absehbarer Zeit über Laserstrahlen oder Mikrowellen zu transportieren.

Bei allen derzeitigen Versuchen steht der ökonomische Nutzen in keinem Verhältnis zum technischen Aufwand, so daß die technische Nutzung vorläufig noch in unüberschaubarer Ferne liegt.

① Lesen Sie im Lehrbuch ESP Kl. 10 nach, welche Aufgaben und Bedeutung der nationale und der internationale Verbundbetrieb haben!

Die Griechen kannten bereits um 500 vor unserer Zeitrechnung die Wirkung einer Glaskugel als Brennglas. Der römische Schriftsteller Seneca (4 v. u. Z. bis 65 u. Z.) führte an, daß kleine Buchstaben durch eine mit Wasser gefüllte gläserne Kugel betrachtet vergrößert erscheinen. Aber erst mit der Herstellung von Lesesteinen (ähnlich einer Briefmarkenlupe) im 13. Jahrhundert begann die Entwicklung der Optik; die Brille und wenig später das Linsenfernrohr wurden erfunden. Die Entwicklung des Linsenfernrohres hatte große Bedeutung für die Astronomie und die Seefahrt. In der darauffolgenden Zeit wurden zahlreiche optische Erscheinungen untersucht und Erklärungen dafür gefunden. Große Verdienste erwarben sich Carl Zeiss (1816 bis 1888) und Ernst Abbe (1840 bis 1905). Sie lösten die bis dahin praktizierte Methode des Probierens bei der Entwicklung optischer Geräte durch eine wissenschaftlich begründete Technologie ab. Es ist ihr Verdienst, daß in der Folge in allen feinmechanisch-optischen Betrieben der Welt die Wissenschaft zur Grundlage der technischen Arbeiten wurde. Das bildete die Grundlage für die Entwicklung einer optischen Industrie. Diese Industrie hat sich zu einem Zweig entwickelt, der für viele Bereiche notwendige Voraussetzungen schafft. Das gilt für die Militärtechnik ebenso wie für die Naturwissenschaften, die Medizin, den Schiff- und Maschinenbau usw. sowie in vielen Bereichen des täglichen Lebens. Die Optik beinhaltet sowohl den subjektiven Vorgang des Sehens als auch die objektiven Vorgänge, denen Licht unterworfen ist. Im ersten Fall spricht man von der biologischen, im zweiten Fall von der physikalischen Optik. Das folgende Kapitel behandelt vor allem die physikalische Optik, auch Lehre vom Licht genannt, mit dem Teilgebiet der klassischen Optik. Die klassische Optik gliedert sich in die geometrische Optik (auch Strahlenoptik) und in die Wellenoptik. Beide Gebiete werden behandelt.

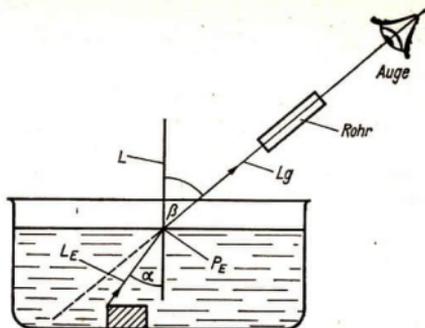
1. Die Bilderzeugung mit Linsen

In vielen Bereichen des täglichen Lebens begegnet man Gegenständen und Geräten, wie Brillen, Lupen, Ferngläsern, Diaprojektoren usw., die auf der Anwendung der verschiedenen optischen Gesetze beruhen. Der folgende Abschnitt wird sich mit diesen Gesetzen und deren Anwendungen in der Praxis auseinandersetzen. Grundlegende Kenntnisse der Strahlenoptik, wie die Reflexion des Lichts, sind dabei Voraussetzung für das Durcharbeiten der folgenden Abschnitte.

Aus Klasse 6 ist bekannt, daß sich das Licht in einem homogenen optischen Stoff geradlinig und gleichmäßig nach allen Seiten ausbreitet. Es ist möglich, den Verlauf des Lichtes im Versuch zu demonstrieren oder in einer Zeichnung darzustellen. Demzufolge unterscheidet man zwischen dem Lichtbündel und dem Lichtstrahl. Die Ausbreitung des Lichtes wird durch den Lichtstrahl gekennzeichnet. **Im homogenen Stoff ist der Lichtstrahl eine Gerade.** Man arbeitet überall dort mit Strahlen, wo die Licht-

ausbreitung rechnerisch oder zeichnerisch verfolgt werden soll. Auch für Beschreibungen bestimmter Sachverhalte wird diese Modellvorstellung genutzt. Dagegen handelt es sich bei Versuchen immer um das reale Lichtbündel.

Führen Sie Versuche zur geradlinigen Ausbreitung des Lichtes durch (PSV 7, V 2.1.2.)!



Das Brechungsgesetz

Beim Betrachten eines klaren Gewässers wird zumeist die Tiefe falsch geschätzt. Das Gewässer erscheint flacher als es in Wirklichkeit ist. Wie läßt sich diese Erscheinung erklären?

Führen Sie hierzu folgenden Versuch durch:

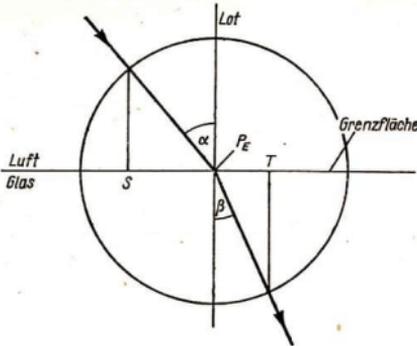
In einer mit Wasser gefüllten Schale befindet sich ein Quader (Bild 165/1). Durch ein dünnes Rohr wird die dem Betrachter abgewandte Kante des Quaders anvisiert. In dieser Lage wird das Rohr in einer Vorrichtung fest angeschraubt. Danach führt man einen passenden Stab vorsichtig in das Rohr in Richtung Quader ein. Man kann jetzt seitlich beobachten, daß der Stab die Kante des Quaders nicht trifft. Der Stab verläuft oberhalb der Körperkante.

Führt man den Versuch 2 ohne Wasser durch, so trifft der Stab auf die Kante des Quaders.

Zur Erklärung dieser Erscheinung muß die Ausbreitung des Lichtes betrachtet werden. Es ist bekannt, daß sich Licht in einem homogenen Stoff geradlinig ausbreitet. Geht es aber von einem Stoff in einen anderen über, so wird Licht im allgemeinen an der Trennfläche beider Stoffe gebrochen. Diese Erscheinung nennt man **Brechung**. Im Versuch reflektiert die Körperkante das auf sie fallende Licht. Dieses geht von Wasser in Luft über. Dadurch wird es an der Trennfläche gebrochen, der Stab jedoch nicht.

Führen Sie Versuche zur Brechung des Lichtes nach PSV 7, V 2.4.3. durch !

Die Auswertung der Versuche zeigt: Geht Licht von einem optisch dichteren Stoff in einen optisch dünneren Stoff über (z. B. von Glas in Luft), so ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Geht Licht von einem optisch dünneren Stoff in einen optisch dichteren Stoff über (z. B. von Luft in Glas), so ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel. Was unter einem optisch dichteren bzw. dünneren Stoff verstanden werden soll, wird auf Seite 166 dargelegt. Die hier getroffenen Aussagen gestatten noch keine Berechnungen der auftretenden Winkel. Deshalb soll nachfolgend untersucht werden, welcher mathematische Zusammenhang zwischen den beiden Winkeln α und β besteht. In einer Zeichnung wird um den Einfallspunkt P_E ein Kreis mit dem Radius r gezeichnet. Von den Schnittpunkten des einfallenden und gebrochenen Lichtstrahls wird je eine Senkrechte auf die Grenzfläche gezogen (Bild 166/1). Die Abschnitte $P_E S$ und $P_E T$ auf der Grenzfläche sind ein Maß für die Ein-



falls- und Brechungswinkel. Es zeigt sich, daß das Verhältnis $\frac{P_E S}{P_E T}$ stets konstant ist. Man bezeichnet es als das Brechungsverhältnis. ①

Für eine weitere mathematische Auswertung wird der Sinus eines jeden Winkels ermittelt und der Quotient aus $\sin \alpha$ und $\sin \beta$ gebildet. Unter Beachtung der aufgetretenen Meßfehler kann formuliert werden:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{konstant} ; \quad \text{für } \alpha \neq 0^\circ ; \quad \alpha \neq 90^\circ \quad \textcircled{2}$$

Man bezeichnet diesen mathematischen Zusammenhang als das Brechungsgesetz. Ermittelt man den Quotienten beim Übergang des Lichtes vom Vakuum in Glas, dann erhält man für die Konstante einen etwas anderen Wert als beim Übergang von Luft in Glas. Man nennt das Brechungsverhältnis gegen Vakuum das absolute Brechungsverhältnis oder die absolute Brechzahl n . Die Brechzahl ist eine charakteristische Größe für den jeweiligen Stoff.

<p>Das Verhältnis vom Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels ist eine Konstante. Sie kennzeichnet den verwendeten Stoff und heißt Brechungsquotient oder Brechzahl n.</p>	$n = \frac{\sin \alpha_{\text{Vakuum}}}{\sin \beta} \quad (1)$
--	--

Einfallender und gebrochener Strahl sowie das Lot liegen dabei in einer Ebene. Die einzelnen Stoffe besitzen unterschiedliche Brechzahlen. Stoffe, die eine größere Brechzahl gegenüber anderen Stoffen besitzen, bezeichnet man als optisch dichter. Stoffe, die eine kleinere Brechzahl gegenüber anderen Stoffen besitzen, bezeichnet man als optisch dünner. Für das Vakuum ist die Brechzahl $n = 1$ festgelegt. Man erkennt aus der Tabelle, daß alle anderen Stoffe eine größere Brechzahl als das Vakuum besitzen.

Brechzahlen einiger Stoffe

Stoff	Brechzahl	Stoff	Brechzahl
Vakuum	1	Kronglas	1,5–1,6
Luft	1,0003	Flintglas	1,6–1,9
Wasser	1,33	Diamant	2,4

Da in vielen Fällen das Licht nicht vom Vakuum, sondern von einem Stoff in einen anderen Stoff übergeht, ergibt sich für das Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

dabei ist n_1 die Brechzahl des Stoffes, in dem das ankommende Licht verläuft.

Der Vergleich der Brechzahlen von Vakuum und Luft zeigt nur sehr geringe Unterschiede. Deshalb setzt man vereinfacht die Brechzahl der Luft der des Vakuums gleich.

Die Brechung des Lichtes wird in der Praxis häufig ausgenutzt. So enthalten viele optische Geräte speziell geschliffene Glaskörper, z. B. Linsen, die das Licht nach einem beabsichtigten Verlauf brechen. In den folgenden Abschnitten wird darauf eingegangen. ③ ④ ⑤

Die Totalreflexion

Geht Licht von einem Stoff in einen anderen Stoff über, so tritt neben der Brechung stets eine Reflexion auf. Das gilt auch für den Übergang von einem dichteren in einen dünneren Stoff. Führt man den Versuch 3 in umgekehrter Richtung durch, so zeigt sich, daß beim Vergrößern des Einfallswinkels der Brechungswinkel schneller größer wird. ⑥

Demonstrieren Sie die Totalreflexion nach PSV 7, V 2.4.4. a bis c und beschreiben Sie Ihre Beobachtung!

Bei einem bestimmten Einfallswinkel verläuft der Lichtstrahl genau an der Grenzfläche beider Stoffe, das heißt, der Brechungswinkel beträgt 90° . Überschreitet man nun diesen Einfallswinkel, so wird das Licht nicht mehr an der Grenzfläche gebrochen, sondern vollständig an ihr reflektiert. Man bezeichnet diese Erscheinung als **Totalreflexion**, da das Licht völlig (total) reflektiert wird. Die Reflexion, die neben der Brechung auftritt, bezeichnet man als partielle (teilweise) Reflexion. Die Totalreflexion tritt nur an der Grenzfläche vom optisch dichteren zum optisch dünneren Stoff auf, wenn ein bestimmter Einfallswinkel überschritten wird. Man bezeichnet den Einfallswinkel, bei dem der Brechungswinkel 90° beträgt, als **Grenzwinkel** α_g . Dieser hängt vom verwendeten Stoff ab und läßt sich nach dem Brechungsgesetz wie folgt berechnen.

$$\frac{\sin \alpha_g}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad \sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \beta$$

-
- ① Konstruieren und berechnen Sie für zwei Einstellungen das Brechungsverhältnis!
 - ② Beachten Sie die Sonderfälle: $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$!
 - ③ Berechnen Sie die Brechzahl von Glas, wenn bekannt ist, daß bei einem Einfallswinkel von 60° der Brechungswinkel im Glas 35° beträgt (Übergang Luft-Glas)!
 - ④ Bei Wasser beträgt der Brechungswinkel bei dem gleichen Einfallswinkel wie in Aufgabe 3 $40,5^\circ$. Berechnen Sie die Brechzahl des Wassers!
 - ⑤ Um welchen Winkel weicht ein Lichtstrahl beim Übergang von Glas ($n = 1,50$) in Luft von seiner ursprünglichen Richtung unter der Bedingung ab, daß der Einfallswinkel a) 15° , b) 40° beträgt?
 - ⑥ Weisen Sie nach, daß bei jeder Brechung ein Teil des Lichtes reflektiert wird!

Für $\beta = 90^\circ$ ist $\sin \beta = 1$. Wird der Versuch zwischen Wasser und Vakuum durchgeführt, so ist $n_1 = 1,33$ und $n_2 = 1$.

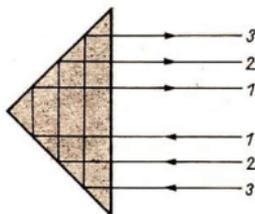
Damit ergibt sich:

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1},$$

$$\sin \alpha_g = \frac{1}{1,33},$$

$$\sin \alpha_g = 0,752,$$

$$\underline{\underline{\alpha_g = 48,7^\circ}}.$$



①

168/1 Umkehrung von Lichtstrahlen durch Totalreflexion an einem Prisma

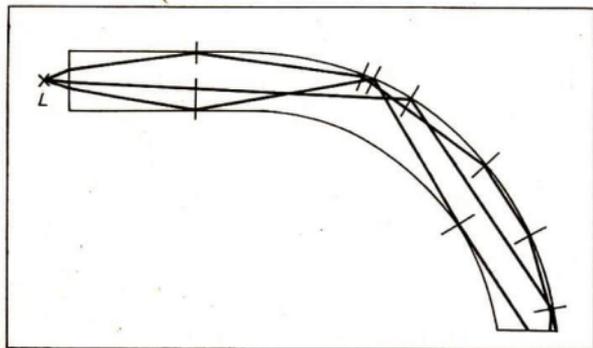
Die Totalreflexion wird in optischen Geräten, z. B. zur Bildumkehrung genutzt. Aus dem Bild 168/1 ist zu erkennen, daß die drei Lichtstrahlen, die auf das gleichschenklige rechtwinklige Prisma auftreffen, das Prisma in umgekehrter Reihenfolge verlassen.

Auch in der Natur sind Erscheinungen bekannt, die mit Hilfe der Totalreflexion erklärt werden können. So beobachtet man an warmen Sommertagen auf langen geraden Straßen Spiegelungen, die auf die Totalreflexion an warmen Luftschichten zurückzuführen sind.

Auf ein Anwendungsbeispiel der Totalreflexion wird im folgenden ausführlicher eingegangen. Dabei handelt es sich um die Entwicklung neuer Leiter zur Übertragung von Informationen, die mit Licht arbeiten, sogenannte **Lichtleiter**. Während heutzutage hauptsächlich noch Kupferleiter zur Übertragung von Informationen, z. B. bei Telefongesprächen, verwendet werden, wird sich mehr und mehr der Lichtleiter durchsetzen. Dabei ist das Licht der Träger der Informationen. Diese sind dem Licht durch Modulation aufgeprägt.

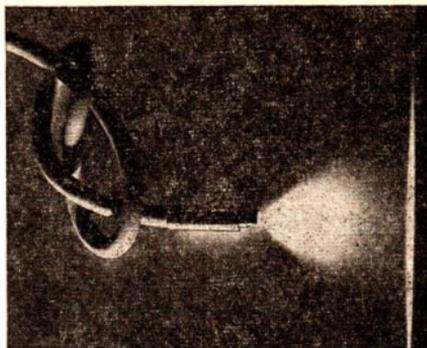
Das Prinzip des Lichtleiters wird zunächst an einem gebogenen Glasstab veranschaulicht (Bild 168/2). ②

Dieser befindet sich in Luft. Das Licht einer Experimentierleuchte dringt an der senkrecht zur Stabachse geschnittenen Fläche in den Glasstab ein und pflanzt sich in ihm fort. Da die Brechzahl des Glases größer ist als die der Luft, können nur solche



168/2
Totalreflexion in einem
Glasstab

Strahlen das Glas verlassen, die unter einem kleineren Winkel als dem Grenzwinkel auf die Grenzschicht zwischen Glas und Luft treffen. Alle anderen Strahlen — und das ist der überwiegende Teil — verlassen den Glasstab an der parallel zur Stabachseliegenden Oberfläche auf Grund der Totalreflexion nicht. Erst am anderen Ende des Glasstabes verläßt das Licht diesen durch die ebenfalls senkrecht zur Stabachse geschnittene Stirnfläche. Im Versuch kann man zeigen, daß das Licht auch den Krümmungen des Glasstabes folgt. Dadurch kann mit Lichtleitern das Licht über große, auch nicht geradlinig verlaufende Strecken relativ verlustarm geleitet werden (Bild 169/1). Würde man versuchen, das Licht über die gleiche Strecke in Luft zu leiten, so wären, bedingt durch die starke Absorption, die Verluste so stark, daß kein Licht am anderen Ende ankäme.



169/1 Lichtleiter in Funktion

Die industriell hergestellten Lichtleiter bestehen aus einem lichtleitenden Kern, der von einer Mantelschicht aus einem Material mit geringerer Brechzahl umgeben ist. Um diese Mantelschicht ist zum mechanischen Schutz des Lichtleiters ein weiterer Mantel angeordnet. Der Lichtleiter dient zur Nachrichtenübermittlung, z. B. für Telefongespräche. Die Verwendung von Lichtleitern anstelle der herkömmlichen Kupferkabel bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Neben den besseren Übertragungstechnischen Eigenschaften der Lichtleiter und ihren geringeren Abmessungen können wertvolle Rohstoffe, wie Kupfer, Blei und Isoliermaterial, eingespart werden. Beträgt beispielsweise die Masse eines 1 Kilometer langen Fernsprechkabels 1590 kg mit einem Kupferanteil von 340 kg, so besitzt ein entsprechendes Lichtleiterkabel nur eine Masse von 180 kg mit einem Anteil an Glas von 30 Gramm. Die Herstellung von Lichtleitern erfordert eine hochreine Kernstruktur mit vorgeschriebenem Brechzahlverlauf. Jede Verunreinigung im Lichtleiter führt zur Lichtdämpfung und damit zu Verlusten.

Der Lichtleiter hat erst durch die Entdeckung des Laserlichtes große Bedeutung erhalten. Laser sind intensiv strahlende, einfarbige Lichtquellen mit hoher Lichtbündelung. Mit Laserlicht ist es möglich, auf einem einzigen Lichtbündel eine große Anzahl von Telefongesprächen oder von Fernsehsignalen zu übertragen. Die zu übertragenden Signale werden hierzu dem Licht aufmoduliert. Das Beispiel Lichtleiter zeigt, welche ökonomischen Vorteile sich aus der Anwendung für die Volkswirtschaft ergeben. Es werden nicht nur wichtige Rohstoffe eingespart, die aus anderen Ländern importiert werden müssen, sondern auch der Aufwand zur Herstellung dieser Lichtleiter ist bei besseren Übertragungseigenschaften wesentlich geringer. Des weiteren stellt die große Zahl der zu übertragenden Informationen einen entscheidenden ökonomischen Faktor dar.

Der Lichtleiter hat erst durch die Entdeckung des Laserlichtes große Bedeutung erhalten. Laser sind intensiv strahlende, einfarbige Lichtquellen mit hoher Lichtbündelung. Mit Laserlicht ist es möglich, auf einem einzigen Lichtbündel eine große Anzahl von Telefongesprächen oder von Fernsehsignalen zu übertragen. Die zu übertragenden Signale werden hierzu dem Licht aufmoduliert.

Das Beispiel Lichtleiter zeigt, welche ökonomischen Vorteile sich aus der Anwendung für die Volkswirtschaft ergeben. Es werden nicht nur wichtige Rohstoffe eingespart, die aus anderen Ländern importiert werden müssen, sondern auch der Aufwand zur Herstellung dieser Lichtleiter ist bei besseren Übertragungseigenschaften wesentlich geringer. Des weiteren stellt die große Zahl der zu übertragenden Informationen einen entscheidenden ökonomischen Faktor dar.

-
- ① Berechnen Sie den Grenzwinkel, wenn das Licht von Glas ($n = 1,50$) in Luft ($n = 1,00$) übergeht!
 - ② Festigen Sie Ihre Kenntnisse über die Modulation anhand des LB Ph 10!

Die Brechung an Linsen

In optischen Geräten, wie Fotoapparat, Fernrohr, Mikroskop usw. werden Linsen eingesetzt, die den Verlauf des Lichtes beeinflussen. Mit Hilfe des Brechungsgesetzes lassen sich die Erscheinungen an optischen Linsen erklären. Unter einer optischen Linse versteht man allgemein einen von zwei Kugelabschnitten begrenzten lichtdurchlässigen Körper. Man unterscheidet zwei Gruppen von Linsen:

- Konvexlinsen oder Sammellinsen; sie sind in der Mitte dicker als am Rande und
- Konkavlinen oder Zerstreuungslinsen; sie sind in der Mitte dünner als am Rande.

①②③

Im Versuch 5 kann man zeigen, daß parallel zur optischen Achse einfallendes Licht an einer Sammellinse in einem Punkt, dem Brennpunkt F , gebündelt wird.

Führen Sie diesen Versuch mit dem Flachglaskörper bikonvex durch! Verwenden Sie parallele Lichtbündel und ändern Sie die Entfernung zwischen optischer Achse und Lichtbündel!

Der Versuch zeigt, daß sämtliche Lichtbündel zweimal an der Linse gebrochen werden (Bild 170/1). Weiterhin kann man beobachten, daß parallele Lichtbündel mit gleichem Abstand von der optischen Achse diese nach dem Verlassen der Linse in einem Punkt schneiden. Lichtbündel, die näher an der optischen Achse liegen, werden nicht so stark gebrochen wie die Lichtbündel, die einen größeren Abstand von der optischen Achse besitzen.

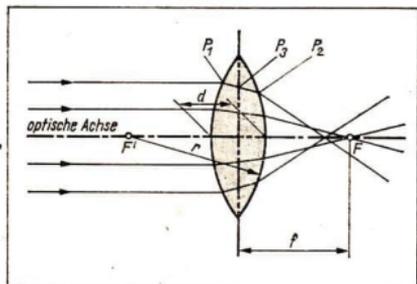
Läßt man parallel zur optischen Achse verlaufendes Licht auf eine Zerstreuungslinse treffen, so verläuft das Licht nach Verlassen der Linse zerstreut. Auch hier findet eine zweimalige Brechung statt, die um so größer ist, je größer der Abstand des Lichtbündels von der optischen Achse ist. Den Brennpunkt einer Zerstreuungslinse erhält man durch die rückwärtige Verlängerung der gebrochenen Lichtstrahlen (Bild 170/2). Es handelt sich dabei um einen virtuellen (scheinbaren) Brennpunkt, da sich in Wirklichkeit in diesem Punkt keine Lichtbündel schneiden.

Für die weitere Behandlung werden zwei wichtige Forderungen gestellt:

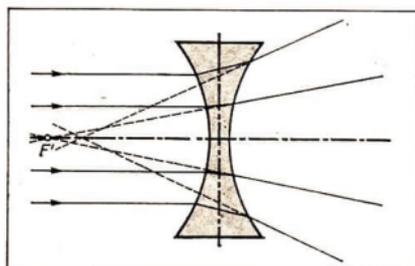
- Es erfolgt eine Einschränkung auf achsennahe Parallelstrahlen und,
- die Dicke der Linse soll vernachlässigt werden.

Für die erste Forderung gilt: **Achsennahe Parallelstrahlen werden durch eine Sammellinse so gebrochen, daß sie sich in einem Punkt, dem Brennpunkt F , schneiden.** Die Vernachlässigung der Dicke der Linse wird anhand von Bild 170/1 erläutert. Verfolgt

170/1 Verlauf von Parallelstrahlen an einer Sammellinse



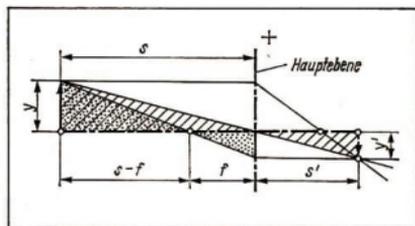
170/2 Verlauf von Parallelstrahlen an einer Zerstreuungslinse



man den Verlauf eines Lichtstrahls, so stellt man zwei Einfallspunkte P_1 und P_2 an der Linse fest. Unter der Voraussetzung, daß die Dicke d der Linse klein gegenüber dem Radius r der beiden Kugelflächen wird, fallen die beiden Einfallspunkte P_1 und P_2 fast zusammen. Man kann dann so verfahren, als ob der Lichtstrahl nur in einem Punkt (P_3) geknickt wird. Verbindet man die Punkte (P_3) sämtlicher achsennaher Parallelstrahlen, so erhält man eine senkrecht zur optischen Achse liegende Ebene, die als Hauptebene der Linse bezeichnet wird. Diese teilt die Linse im Bild 170/1 genau in der Mitte. Den Abstand von der Hauptebene der Linse bis zum Brennpunkt F nennt man die Brennweite f . In Konstruktionen wird oft vereinfacht nur diese Hauptebene gezeichnet und mit einem $+$ für Sammellinsen bzw. einem $-$ für Zerstreuungslinsen versehen. Die Verwendung von dicken Linsen hat zur Folge, daß zwei Hauptebenen existieren, die je nach der Form der Linse auch außerhalb dieser liegen können.

Die Linsengleichung

Mit Hilfe von Linsen können Abbildungen von Gegenständen erzeugt werden. Anhand der Bildentstehung an einer Sammellinse kann gezeigt werden, daß ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Gegenstandsgröße und der Bildgröße sowie der Gegenstandsweite und der Bildweite besteht. ④



171/1 Bildentstehung an einer Sammellinse

Bild 171/1 zeigt die Bildkonstruktion an einer Sammellinse mit Hilfe von drei Strahlen. Bezeichnet man die Gegenstandsgröße mit y , die Bildgröße mit y' , die Gegenstandsweite mit s und die Bildweite mit s' , so erkennt man aus der geometrischen Ähnlichkeit der beiden schraffierten Dreiecke die Beziehung:

$$y:y' = s:s' \quad (3)$$

Das Verhältnis $\frac{y}{y'} = \beta$ wird als **Abbildungsmaßstab** bezeichnet. Mit dem Abbildungsmaßstab kann die Vergrößerung oder Verkleinerung von optischen Geräten ermittelt werden. Der Abbildungsmaßstab ist für ein und dieselbe Linse nicht konstant (vergl. auch Seite 175). ⑤

- ① Informieren Sie sich über Linsenformen und über den Strahlenverlauf an Sammel- und Zerstreuungslinsen im LB Ph 6!
- ② Untersuchen Sie verschiedene Brillengläser und ordnen Sie diese in die jeweilige Gruppe ein!
- ③ Führen Sie nach PSV 7, V 3.1.4. durch und stellen Sie die Bedingungen auf, bei denen die getroffenen Aussagen gelten!
- ④ Informieren Sie sich über die Bildentstehung an Sammellinsen im LB Ph 6!
- ⑤ Ermitteln Sie den Abbildungsmaßstab einer Sammellinse (PSV 7, V 3.1.8.)!

Projiziert man die Bildgröße y' auf die Hauptebene der Linse und betrachtet die beiden mit Punkten versehenen Dreiecke, kann man für $y:y' = s:s'$ auch schreiben:

$$y:y' = (s-f):f \quad \text{oder}$$

$$\frac{y}{y'} = \frac{s-f}{f} = \frac{s}{s'}$$

Betrachtet man nur $\frac{s-f}{f} = \frac{s}{s'}$, und dividiert durch s , so erhält man: $\frac{s-f}{s \cdot f} = \frac{1}{s \cdot s'}$.

Daraus ergibt sich:

$$\frac{s}{s \cdot f} - \frac{f}{s \cdot f} = \frac{1}{s \cdot s'} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{1}{s'}$$

Durch Umstellen erhält man die

Linsengleichung	$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ (4)
------------------------	--

①②

Diese Gleichung gilt für konkave und konvexe Linsen. Dabei wird gefordert, daß die Brechzahl der Linse größer ist als die Brechzahl des sie umgebenden Stoffes. Außerdem dürfen nur achsennahe Strahlen betrachtet werden. Verlaufen die Strahlen nicht parallel zur optischen Achse, dann wird weiterhin gefordert, daß der Neigungswinkel der Strahlen sehr klein gegenüber der optischen Achse ist. Durch Umstellen der Linsengleichung (4) erhält man die Form:

$$f = \frac{s \cdot s'}{s + s'} \quad (5)$$

Die Brennweite f wird in Millimeter angegeben.

③

Häufig wird in der Optik der Begriff **Brechkraft** verwendet. Unter der Brechkraft einer Linse versteht man den Kehrwert der auf Luft bezogenen Brennweite. Die Einheit ist die **Dioptrie** (dpt), wobei $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$.

Es gilt: $D = \frac{1}{f}$ Die Brennweite wird hierbei in Meter eingesetzt.

■ Wie groß ist die Brechkraft einer Sammellinse mit einer Brennweite von 333 mm?

Gegeben:

Lösung:

$$f = +333 \text{ mm}$$

$$D = \frac{1}{f} \quad D = \frac{1}{+0,333 \text{ m}} \quad D = + \frac{3}{\text{m}} \quad \underline{\underline{D = 3 \text{ dpt}}}$$

Gesucht:

D in dpt

Die Sammellinse besitzt eine Brechkraft von +3 Dioptrien.

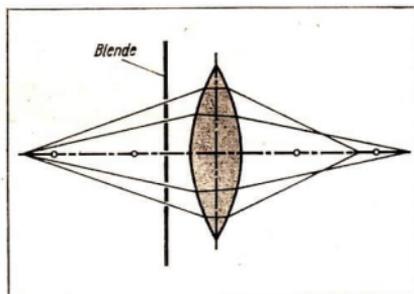
④③⑥⑦

Abbildungsfehler durch Linsen

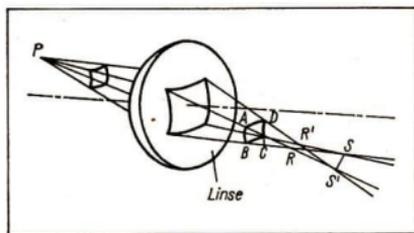
Die Abbildungen von Gegenständen mittels Linsen sind nicht fehlerfrei. Diese sogenannten Bildfehler sind nicht auf fehlerhafte Linsen zurückzuführen, sondern sind bedingt durch das Brechungsgesetz und die Kugelgestalt der Linsenflächen. Man bezeichnet sie als geometrische Fehler oder geometrische **Aberration** (Abirrungen der Strahlen). Zu diesen Fehlern gehören der Öffnungsfehler, der Astigmatismus, die Bildfeldwölbung, die Koma und die Verzeichnung.

Der Öffnungsfehler. Er entsteht, wenn ein weit geöffnetes Lichtbündel von einem Gegenstandspunkt auf die Linse trifft (Bild 173/1). Das hat zur Folge, daß die von den einzelnen Strahlen erzeugten Abbildungen unterschiedlich groß sind. Man beseitigt den Öffnungsfehler, indem man Sammell- und Zerstreuungslinsen kombiniert einsetzt. Dadurch rückt der Schnittpunkt von achsennahen Strahlen an der Sammellinse in den Schnittpunkt von achsenfernen Strahlen an der Zerstreuungslinse bzw. rückt der Schnittpunkt von achsenfernen Strahlen an der Sammellinse in den Schnittpunkt der achsennahen Strahlen der Zerstreuungslinse. Relativ leicht läßt sich der Fehler auch durch Einsatz von Blenden beseitigen, jedoch kann dann ein großer Teil des Lichtes nicht für die optische Abbildung genutzt werden.

Astigmatismus und Bildfeldwölbung. Diese beiden Fehler treten nur bei außerhalb der optischen Achse gelegenen Gegenstandspunkten auf. Im Bild 173/2 ist der Strahlenverlauf dargestellt. Man erkennt, daß die von einem Gegenstandspunkt P ausgehenden vier Strahlen nach der Brechung nicht durch einen Schnittpunkt gehen. Vielmehr

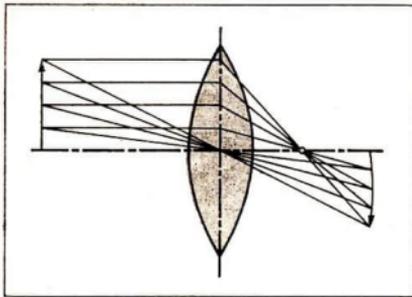


173/1 Strahlengang beim Öffnungsfehler



173/2 Astigmatisches Strahlenbündel

- ① Bestätigen Sie die Richtigkeit der Gleichung in einem Experiment (PSV 7, V 3.1.8.)!
- ② Wo erhält man das Bild eines Lichtpunktes, der 60 cm von einer Sammellinse mit der Brennweite von 240 mm entfernt ist?
- ③ Ermitteln Sie die Brennweite einer Sammellinse über die Abbildungsgleichung nach PSV 7, V 3.1.10.!
- ④ Ermitteln Sie die Brechkraft verschiedener Brillengläser (ähnlich wie V 5.4.8. in Anleitungen zum SEG Optik)!
- ⑤ Bei der Bildentstehung an einer Sammellinse werden folgende Größen ermittelt: Gegenstandsweite mit 120 mm, Bildweite mit 600 mm. Berechnen Sie die Brennweite dieser Linse und überprüfen Sie das Ergebnis experimentell!
- ⑥ Wie groß ist die Brechkraft einer Zerstreuungslinse mit einer Brennweite von -80 mm?
- ⑦ Wie groß sind die Brennweiten der Linsen mit einer Brechkraft von $+10$ dpt, $+0,75$ dpt und -8 dpt?



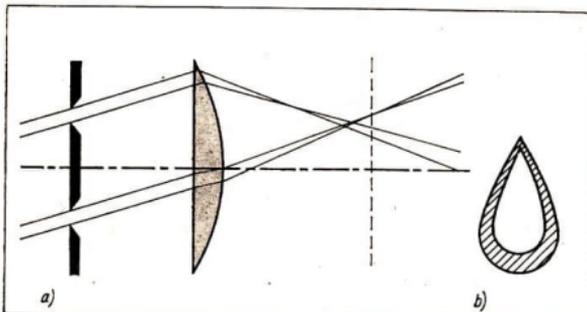
174/1 Strahlenverlauf zur Bildfeldwölbung

ergeben sich vier Schnittpunkte. So schneiden sich die Strahlen A und B im Punkt R und D und C im Punkt R'. Die Strahlen B und C schneiden sich im Punkt S und A und D im Punkt S'. Das bedeutet, daß ein Gegenstandspunkt nicht in einem Bildpunkt abgebildet wird. Betrachtet man die Gesamtheit aller möglichen Strahlen, so erhält man Schnittpunkte der oben genannten Strahlen, die auf zwei Brennlinien liegen. Im Bild sind das die Linien zwischen den Punkten R und R' sowie S und S'. Man erkennt, daß die Brennlinien örtlich verschoben sind. Im allgemeinen wird der Astigmatismus größer, je weiter sich der abzubildende Gegenstand von der optischen Achse entfernt.

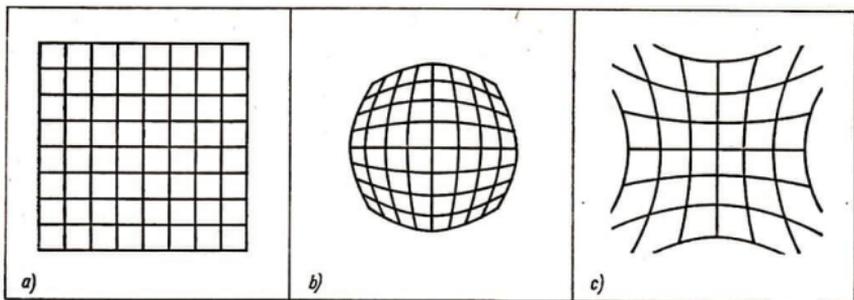
Auch hier spielt der Einsatz von Blenden zur teilweisen Beseitigung des Fehlers eine Rolle. Betrachtet man nicht nur einen Gegenstandspunkt, sondern einen ausgedehnten Gegenstand, so zeigt sich eine gekrümmte Abbildung vom Gegenstand (Bild 174/1). Man bezeichnet diese Erscheinung als Bildfeldwölbung.

Koma. Auch dieser Fehler tritt nur für Gegenstandspunkte auf, die außerhalb der optischen Achse liegen. Das Bild eines seitwärts von der Achse liegenden Gegenstandspunktes ergibt eine kometenschweifartige Figur, die als Koma bezeichnet wird. Mit Bild 174/2a soll das Entstehen des Fehlers erläutert werden. Vor einer Sammellinse wird symmetrisch zur optischen Achse eine Blende mit einem ausgeschnittenen Kreisring aufgestellt. Von einem weit entfernten Gegenstand treffen Strahlenbündel nahe der optischen Achse und entfernt von ihr auf die Linse. Man erkennt, daß sich das Strahlenbündel, welches weiter entfernt von der optischen Achse die Linse durchsetzt, näher der Linse in einem Punkt vereinigt. Stellt man einen Projektionsschirm in die Ebene E, so entsteht die im Bild 174/2b dargestellte Figur. Bei guten fotografischen Objektiven ist dieser Fehler völlig beseitigt. Man erreicht dies durch Anordnungen von zwei gleichen oder aus ähnlichen Hälften bestehenden Doppelobjektiven. Aber auch durch hinreichendes Abblenden der benutzten Linse kann der Fehler eingeschränkt werden.

Die Verzeichnung. Bei der Abbildung eines Gegenstandes muß die Forderung erhoben werden, daß Bild und Gegenstand geometrisch ähnlich sind. Ist das nicht der Fall,



174/2
a und b Koma bei einer Ringblende



175/1 a, b und c Verzeichnung eines quadratischen Gitters

dann spricht man von Verzeichnung. Man unterscheidet zwei Arten von Verzeichnungen

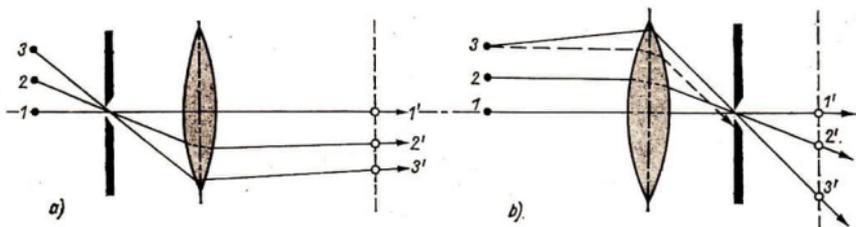
a) die kissenförmige Verzeichnung und b) die tonnenförmige Verzeichnung.

Der Fehler wird dadurch hervorgerufen, daß der Abbildungsmaßstab für achsenferne Strahlen anders ist als für achsennahe. Ist der Abbildungsmaßstab für einen Gegenstand in Achsennähe größer als in Achsenferne, so heißt die Verzeichnung tonnenförmig (Bild 175/1 b). Dagegen erhält man eine kissenförmige Verzeichnung, wenn der Abbildungsmaßstab in Achsennähe kleiner als in Achsenferne ist (Bild 175/1 c).

Der Fehler kann nachgewiesen werden, indem man vor einer Experimentierleuchte ein feinmaschiges quadratisches Gitter (Bild 175/1 a) aufstellt und die Abbildung dieses Gitters mit Hilfe einer Sammellinse auf einem Projektionsschirm erzeugt. Entscheidend hierbei ist die Lage der Blende.

Befindet sich die Blende vor der Linse (Bild 175/2 a), so erhält man eine tonnenförmige Verzeichnung, befindet sie sich hinter der Linse (Bild 175/2 b), so ist die Verzeichnung kissenförmig. ^②

Damit durch den Einsatz einer Blende keine Verzeichnung des Bildes hervorgerufen wird, muß sie so angeordnet sein, daß die durch den optischen Mittelpunkt der Linse gehenden Strahlen ungehindert hindurchgehen. Das wird erreicht, durch das Zusammensetzen von mindestens zwei Linsen, zwischen denen die Blende angeordnet ist.



175/2 Zum Entstehen der Verzeichnung

- ① Führen Sie Versuche zum Astigmatismus und zur Bildfeldwölbung nach PSV 7, V 3.2.7.; V 3.2.11. und V 3.2.9. durch!
- ② Führen Sie Versuche zur tonnen- und kissenförmigen Verzeichnung nach PSV 7, V 3.2.12. durch!

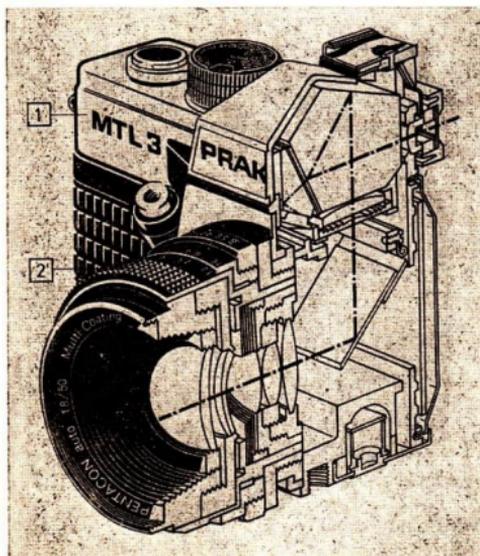
Der Farbfehler (chromatische Aberration). Ein Fehler ganz anderer Natur tritt auf, wenn sogenanntes weißes Licht, z. B. das Licht einer Glühlampe, durch eine Sammellinse geht. Trifft dieses Licht auf einen Projektionsschirm, so erkennt man farbige Ränder. Schon Newton (1643 bis 1727) zeigte in Versuchen, daß sich weißes Licht aus verschiedenen Farbanteilen zusammensetzt (vergl. Seite 202). Für die einzelnen Farbanteile gelten unterschiedliche Brechzahlen n . Dadurch werden die verschiedenen Farbanteile unterschiedlich stark gebrochen, und es kommt somit zu den Farberscheinungen. Diese Farberscheinungen treten nicht nur an Linsen auf. Der Farbfehler läßt sich beseitigen, wenn in Versuchen mit einfarbigem Licht, z. B. durch Vorsetzen von Farbfiltern (vergl. Seite 211) vor die Lichtquelle gearbeitet wird. Da man in der Fotografie zumeist mit weißem Licht arbeitet, muß dieser Fehler korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt durch Zusammenstellen einer Sammel- und einer Zerstreulinse, die unterschiedliche Brennweiten besitzen und aus verschiedenen Glassorten bestehen. ①

2. Bildspeicherung im fotografischen Negativ und Positiv

Der Fotoapparat

Der Fotoapparat dient zur Aufnahme eines reellen Bildes auf einer lichtempfindlichen Schicht. Mit ihm können Abbildungen von Gegenständen erzeugt und fotografisch gespeichert werden.

Ist der Gegenstand sehr weit entfernt, so entsteht dann ein scharfes Bild, wenn die Filmebene und die Brennebene des Objektivs zusammenfallen. Nähert sich der Gegenstand dem Fotoapparat, so muß nach der Gleichung (4) der Abstand zwischen Filmebene und Objektiv vergrößert werden. ②



176/1 Spiegelreflexkamera im Schnitt

Die Hauptteile des Fotoapparates sind das **Objektiv** (2) mit Entfernung- und Blenden-einstellung, das **Gehäuse** (1) mit Halterung für die lichtempfindliche Schicht (Platte oder Film), der **Verschluss** zur zeitlichen Begrenzung der Belichtung und der **Sucher** zur Wahl des Bildausschnittes (Bild 176/1). Seit der Entwicklung des Fotoapparates kennt man heute je nach der Gestaltung des Gehäuses mehrere Bauarten, wie Kastenkamera, Balgenkamera, Springkamera, Kleinbildkamera usw. Die Formate der Bildfenster können sehr unterschiedlich sein. Am weitesten verbreitet sind Fotoapparate mit einem Bildfenster von 24 mm × 36 mm. Andere Formate sind z. B. 24 mm × 24 mm oder 6 cm × 6 cm. Die großen Plattenkameras mit den Foto-platten sind heute nur noch selten, z. B. für Porträtaufnahmen, in Gebrauch. ③

Das Objektiv. Als Objektiv bezeichnet man den Teil des Fotoapparates, der das Zu-standekommen der Abbildung eines Gegenstandes auf der lichtempfindlichen Schicht bewirkt. Die Bezeichnung Objektiv ist historisch entstanden und wurde vom Fern-rohr übernommen. Hier bezeichnet man das Linsensystem, welches dem zu betrach-tenden Objekt zugewandt ist, als Objektiv und das Linsensystem, das dem Auge zuge-wandt ist, als Okular.

An das Objektiv werden hohe Anforderungen gestellt. Es darf keinen Astigmatismus aufweisen, muß sphärisch und chromatisch korrigiert sein und ein vollkommen ebenes Bild ohne Verzeichnung liefern. Letzteres ist besonders wichtig für Aufnahmen, die zu Vermessungen dienen, z. B. bei Architekturaufnahmen für den Denkmalschutz. Des weiteren verlangt man einen nicht zu kleinen Bildwinkel sowie eine große Licht-stärke. Dies wird durch das Zusammenstellen verschiedener Linsenkombinationen aus geeigneten Glassorten erreicht. Die Linsen werden nach komplizierten Berechnungen geschliffen. Für diese Berechnungen ist die moderne Rechentechnik auf der Grundlage der Mikroelektronik eine bedeutende Hilfe. Dadurch ist es möglich, in kürzester Zeit umfangreiche Berechnungen durchzuführen und somit wesentlichen Einfluß auf den ökonomischen Faktor bei der Herstellung von hochwertigen Linsensystemen zu nehmen.

Die einzelnen Objektiv besitzen Bezeichnungen, wie Triplets, Aplanate, Anastigma-te usw. ④

Besteht das Objektiv aus nur einer Linse, so treten alle vorn beschriebenen Abbil-dungsfehler auf. Die prinzipielle Arbeitsweise kann mit einer Sammellinse verglichen werden. Das vom Gegenstand kommende Licht wird in der Linse gebrochen und trifft auf den Film. Es entsteht ein reelles, seitenvertauschtes, verkleinertes und umgekehrtes Bild. Das Bild läßt sich sehr einfach nachweisen, indem man die Rückseite eines Fotoapparates (ohne Film) öffnet und anstelle des Films vorsichtig ein Stück Trans-parentpapier einlegt. Durch Öffnen des Verschlusses (auf Zeit stellen!) kann das Bild beobachtet werden. ⑤

Für das Fotografieren bestimmter Objekte ist es oft erforderlich, den Fotoapparat näher an das Objekt heran oder weiter weg zu führen. Damit ändert sich das **Sichtfeld**.

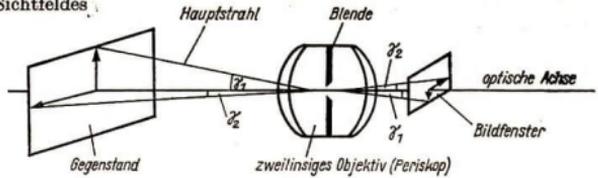
① Demonstrieren Sie die Entstehung des Farbfehlers an einer Sammellinse nach PSV 7, V 3.2.4.

② Mit einem Fotoapparat ($f = 50$ mm) soll ein Gegenstand mit den Abmessungen 120 cm × 120 cm auf einen 6 cm × 6 cm Filmformat aufgenommen werden. Wie groß muß die Ent-fernung zwischen Objektiv und Gegenstand sein, wenn die Größe des Filmformates völlig ausgenutzt wird? (Ansatz: $y:y' = (s-f):f$)

③ Informieren Sie sich anhand von Prospekten über die handelsüblichen Fotoapparate in der DDR!

④ Informieren Sie sich anhand von Prospekten über den Aufbau der handelsüblichen Objektive!

⑤ Führen Sie diesen Versuch durch und bewegen Sie den Fotoapparat abwechselnd senkrecht und waagrecht! Beobachten Sie anschließend bei ruhendem Fotoapparat ein seitlich bewegtes Objekt!



Das ist die gegenstands- oder bildseitige Begrenzung des Strahlenraumes eines Fotoapparates. Man kann das Sichtfeld mit Hilfe des Gegenstands- bzw. Bildwinkels ermitteln. Gegenstand- und Bildwinkel werden als doppelter Wert des Winkels angegeben, den ein zum Sichtfeldrand gehörender Hauptstrahl mit der optischen Achse einschließt (Bild 178/1).

Oftmals ist es infolge örtlicher Gegebenheiten nicht möglich, die Entfernung zwischen Fotoapparat und dem aufzunehmenden Objekt so zu ändern, daß man das gewünschte Sichtfeld erhält. Daher ist es notwendig, Fotoapparate mit austauschbaren Objektiven verschiedener Brennweiten einzusetzen. Prinzipiell können drei unterschiedliche Objektive verwendet werden:

1. Das Normalobjektiv. Die Brennweite des Normalobjektivs eines Fotoapparates entspricht ungefähr der Diagonalen des Bildfensterformates (z. B. $f = 50$ mm bei einem Bildfenster von $24 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$) mit einem Bildwinkel von 40° bis 55° . Es ist das verbreitetste unter den Objektiven.

2. Das Weitwinkelobjektiv. Es besitzt beispielsweise eine Brennweite von $f = 30$ mm und einen Gegenstands- bzw. Bildwinkel über 55° . Mit diesem Objektiv wird ein Sichtfeld erfaßt, das mit einem Normalobjektiv nur bei größerem Abstand vom Objekt erreicht wird. Man setzt es vor allem dann ein, wenn keine Möglichkeit besteht, durch Vergrößern der Entfernung zum Objekt das gesamte Sichtfeld zu erfassen (z. B. Aufnahmen von Personen in geschlossenen Räumen oder von Häusern in engen Straßen). Bei minderwertigen Weitwinkelobjektiven entstehen am Rande der Abbildungen Bildfeldwölbungen.

3. Die Fernobjektive. Sie besitzen einen Bildwinkel, der kleiner als 35° ist und werden zur Aufnahme weit entfernter Objekte eingesetzt. Ihre Wirkungsweise ist ähnlich der von Fernrohren (vgl. Seite 189 ff). Im Vergleich zu einem Normalobjektiv ist das vom Fernobjektiv entworfene Bild um den Betrag

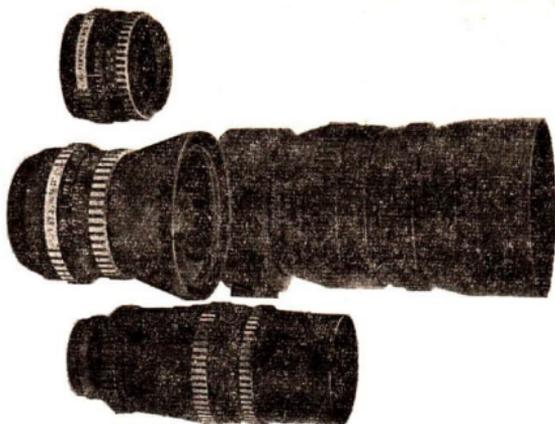
$$\text{Vergrößerung } V = \frac{\text{Brennweite } f_2 \text{ des Fernobjektivs}}{\text{Brennweite } f_1 \text{ des Normalobjektivs}} \text{ größer.}$$

Wegen ihrer großen Brennweiten (z. B. $f = 500$ mm; $f = 1000$ mm) besitzen sie eine große Baulänge und eine entsprechend große Masse. Dadurch sind sie nicht sehr handlich und nehmen einen großen Raum ein. Sehr oft wird deshalb eine Bauform verwendet, die als **Teleobjektiv** bezeichnet wird. Durch Kombination entsprechender Linsen oder durch Einsatz von Spiegeln (Spiegelobjektiv) kann die Baulänge des Objektivs bei gleicher Brennweite merklich verkürzt werden. ①

Bild 179/1 zeigt Objektive mit unterschiedlichen Brennweiten.

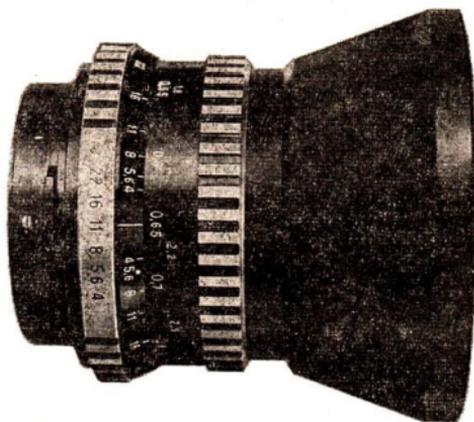
Die Entfernungseinstellung. Im Experiment läßt sich leicht zeigen, daß sich die Bildweite mit der Gegenstandsweite an einer Linse ändert. Das hat beim Fotoapparat zur Folge, daß beim Scharfeinstellen weit entfernter und nicht weit entfernter Objekte auf der lichtempfindlichen Schicht der Abstand zwischen Linse (Objektiv) und Film ge-

179/1
 Objektive
 verschiedener Brennweiten
 für die Praktica
 super TL 3



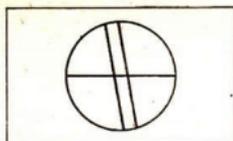
ändert werden muß. Man erreicht das durch Drehen des am Objektiv dafür vorgesehenen Einstellrings. Dieser ist innen mit einem Gewindegang versehen und schiebt je nach Drehrichtung das gesamte Linsensystem entweder näher an den Film oder weiter weg von ihm. Auf dem Einstellring sind die Entfernungangaben in Meter eingraviert (Bild 179/2).

Um die richtige Entfernung einzustellen, können je nach Typ des Fotoapparates folgende Möglichkeiten beschriftet werden. ② ③

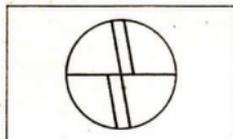


179/2
 Einstellungen
 am Objektiv

- ① Berechnen Sie die Vergrößerung, wenn anstelle des Normalobjektivs ($f = 50 \text{ mm}$) das Fernobjektiv ($f = 300 \text{ mm}$) eingesetzt wird!
- ② Untersuchen Sie die Lageänderung des gesamten Linsensystems an einem auswechselbaren Objektiv!
- ③ Überlegen Sie, bei welcher Einstellung der Entfernung am Objektiv der größte Abstand vom Film erreicht wird!



a)



b)

180/1

a) und b)

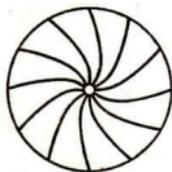
Sucherbild mit Anzeige zur Einstellung der Schärfe bei der Practicasuper TL 3

a) Die Entfernung vom Fotoapparat bis zum Objekt wird gemessen oder geschätzt und dann am Einstellring eingestellt. Diese Methode kann vor allem bei Schätzungen zu Ungenauigkeiten führen. b) In den Spiegelreflexmodellen (Bild 176/1) erfolgt die Entfernungseinstellung durch Scharfeinstellen des Sucherbildes. Durch den Sucher wird eine vom Objektiv erzeugte Abbildung auf einer Mattscheibe mit dem Einstellring scharf eingestellt. In den Strahlengang ist ein klappbarer Spiegel eingebaut, welcher das Licht auf die Mattscheibe des Suchers reflektiert. Beim Auslösen des Verschlusses (vergl. Seite 176) klappt der Spiegel nach oben, und das Licht trifft auf den Film. Hochwertige Fotoapparate besitzen zur Einstellung der Schärfe Meßkeile und einen Mikrorasterring im Sucherbild des Prismensuchers. Diese garantieren ein schnelles und sicheres Einstellen der Bildschärfe. Die Einstellung erfolgt ebenfalls am Objektiv und ist dann richtig vorgenommen, wenn man im Sucherbild die im Bild 180/1a dargestellte Figur erhält. ①

Die Schärfentiefe. Das Scharfeinstellen eines Objektes auf der lichtempfindlichen Schicht erfolgt durch Einstellen des Abstandes zwischen Objektiv und Film. Damit ist strenggenommen nur die Ebene des Objektes scharf auf dem Film abgebildet. In Aufnahmen zeigt sich jedoch, daß Gegenstände, die sich nicht allzuweit vor oder hinter dem Objekt befinden, auch noch scharf erscheinen. Mit zunehmendem Abstand vom Objekt stellt man jedoch fest, daß die Gegenstände dann unscharf werden. Das bedeutet für die Fotografie, daß nicht nur eine ganz bestimmte Ebene, sondern ein mehr oder weniger großer Bereich scharf abgebildet wird. Man nennt diesen Bereich die **Schärfentiefe**. Die Schärfentiefe ist abhängig von der Brennweite des Objektivs, der Aufnahmeentfernung und der Objektivöffnung.

Die Objektivöffnung wird bestimmt durch die im Objektiv eingebaute Blende. Hier ist nur die verstellbare Zwischenblende gemeint. Auf andere Blenden sowie auf ihre entsprechende Lage kann nicht eingegangen werden.

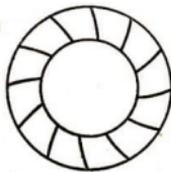
Die Blendeneinstellung. Die Blende ist ein lichtundurchlässiger Körper, der in der Mitte eine kreisförmige Öffnung besitzt, deren Mittelpunkt auf der optischen Achse liegt. Bei den meisten Objektiven kann die Öffnung durch eine **Irisblende** verändert werden. Das ist eine aus mehreren sichelförmigen Lamellen bestehende Blende. Diese Lamellen sind zumeist aus dünnem Stahlblech und an einem Ende drehbar gelagert. Durch Drehen am Blendeneinstellring (Bild 179/2) verändert sich die Lage der einzelnen Lamellen und damit der Durchmesser der Blendenöffnung (Bild 180/2a bis c). ② Mit der Einstellung der Blende werden der Lichteinfall und die Schärfentiefe reguliert. Eine große Blendenöffnung (kleine Blendenzahl) läßt viel Licht durch, jedoch ist die



a)



b)

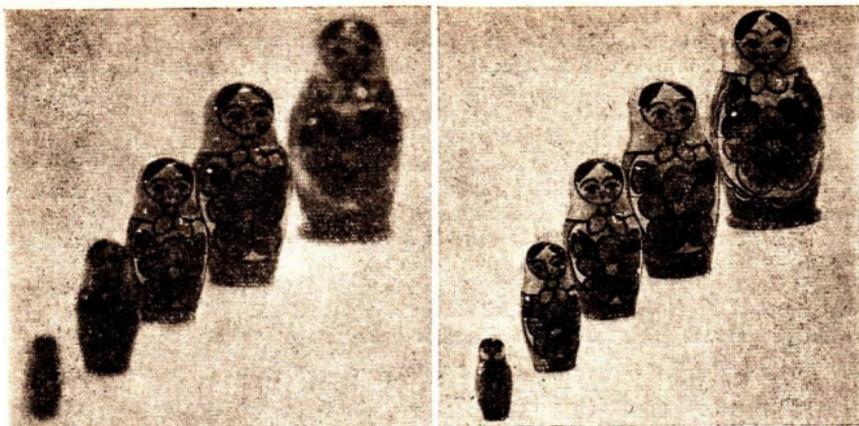


c)

180/2

a) bis c)

Irisblende mit verschiedener Einstellung



181/1 a) Aufnahme mit großer Objektivöffnung b) Aufnahme mit kleiner Objektivöffnung

Schärfentiefe geringer als bei einer kleineren Blendenöffnung. Legt man also Wert auf eine große Schärfentiefe, dann muß eine kleinere Blendenöffnung gewählt werden. Die kleine Blendenöffnung läßt aber entsprechend weniger Licht durch das Objektiv. Das hat zur Folge, daß die Zeit für das Belichten des Films bei gleicher Beleuchtung des Objektes erhöht werden muß. Bei ruhenden Objekten bereitet es wenig Schwierigkeiten, die Belichtungszeit bei Einstellung einer kleinen Blendenöffnung zu verlängern. Bewegen sich die Objekte, dann kann man die Belichtungszeit nicht beliebig lang wählen, ohne verschwommene Aufnahmen zu erhalten. Deshalb ist die Einstellung der Blende auf die Belichtungszeit für das Erreichen guter Aufnahmen von Bedeutung. Bild 181/1 zeigt zwei Aufnahmen mit unterschiedlicher Schärfentiefe.

Man erkennt in Aufnahme a), daß die Schärfentiefe gering ist. Lediglich das Objekt ist scharf abgebildet, auf welches das Objektiv eingestellt wurde. In der Aufnahme b) erreichte man durch Einstellen einer kleinen Blendenöffnung eine große Schärfentiefe. ③

Die Belichtungszeit. Unter der Belichtungszeit versteht man die Zeit, die die lichtempfindliche Schicht des Films dem Licht ausgesetzt ist. Die richtige Belichtungszeit ist von der Beleuchtungsstärke des Lichtes in der Filmebene und der Empfindlichkeit des lichtempfindlichen Materials (Seite 183) abhängig.

Der Film ist richtig belichtet, wenn die im Objekt enthaltenen Helligkeitsstufen naturgetreu im fotografischen Bild wiedergegeben sind. Wird die lichtempfindliche Schicht zu lange belichtet, dann spricht man von überbelichtetem Film, bei zu kurzer Belichtung von unterbelichtetem Film. Die Belichtungszeit wird durch einen im Fotoappa-

-
- ① Führen Sie die Entfernungseinstellungen nach den beschriebenen Möglichkeiten durch! Fotografieren Sie Objekte in größerer und geringerer Entfernung und vergleichen Sie die Genauigkeit der Einstellung!
 - ② Betrachten Sie die Öffnung der Blende bei verschiedenen Einstellungen am Objektiv und vergleichen Sie Blendenzahl und Größe der Öffnung!
 - ③ Führen Sie Aufnahmen mit unterschiedlichen Blendeneinstellungen vom gleichen Objekt durch und vergleichen Sie nach dem Entwickeln die Schärfentiefe der einzelnen Aufnahmen!

rat eingebauten Verschuß mit veränderlichen Öffnungszeiten erreicht. Man unterscheidet zwischen dem **Objektiv-** und dem **Bildfensterverschuß**. Der Objektivverschuß arbeitet ähnlich wie die Irisblende. Er befindet sich innerhalb des Linsensystems oder in dessen unmittelbarer Nähe. Man bezeichnet ihn auch als **Zentralverschuß**. Die Belichtungszeit wird durch unterschiedliches Spannen der Feder eingestellt. Liegt der Verschuß in unmittelbarer Nähe der Blendenebene, dann erfolgt die Belichtung des gesamten Bildes gleichzeitig. Die übliche Form des Bildfensterverschlusses ist der **Schlitzverschuß**. Er ist direkt vor dem zu belichtenden Filmmaterial angeordnet. Beim Auslösen des Verschlusses bewegt sich der Schlitz entlang dem gesamten Bildfenster. Durch Veränderung der Breite des Schlitzes wird die Belichtungszeit eingestellt.

Die Einstellung der Belichtungszeit erfolgt entweder am Objektiv (Objektivverschuß) oder am Gehäuse des Fotoapparates (Bildfensterverschuß). Die Öffnungszeiten werden in Sekunden angegeben und sind einheitlich in folgenden Stufen festgelegt.

8 s; 4 s; 2 s; 1 s; $\frac{1}{2}$ s; $\frac{1}{4}$ s; $\frac{1}{8}$ s; $\frac{1}{16}$ s; $\frac{1}{30}$ s; $\frac{1}{60}$ s; $\frac{1}{125}$ s; $\frac{1}{250}$ s; $\frac{1}{500}$ s; $\frac{1}{1000}$ s.

Hiervon abweichende Werte findet man noch bei älteren Fotoapparaten. Außerdem besteht die Möglichkeit, bei der Einstellung auf B den Verschuß solange wie gewünscht offen zu halten.

Damit die richtige Wahl der Belichtungszeit getroffen werden kann, bedient man sich einer Belichtungstabelle oder eines Belichtungsmessers. Belichtungstabellen enthalten nur grobe Informationen zur Einstellung der Belichtungszeit für Außenaufnahmen mit entsprechenden Lichtverhältnissen (Bild 182/2).

Mit dem fotoelektrischen Belichtungsmesser kann die Belichtungszeit genauer ermittelt werden (Bild 182/1). Die Bedienung des fotoelektrischen Belichtungsmessers erfolgt in Teilschritten. Zunächst wird das Einstellen der Lichtempfindlichkeit (Seite 184) vorgenommen. Anschließend richtet man den Belichtungsmesser auf



182/1 Fotoelektrischer Belichtungsmesser

182/2
Belichtungstabelle
für ORWO Chrom-Film UT 18

$\frac{1}{125}$ s			
	f/11	8	5,6
	f/8	5,6	4
	f/5,6	4	2,8

das zu fotografierende Objekt, wobei der Zeiger des Instrumentes einen bestimmten Ausschlag zeigt. Je nach Art des Belichtungsmessers stellt man dann den angezeigten Wert des Meßinstrumentes auf einer verstellbaren Skale ein. Dadurch wird gleichzeitig die Einstellung der Belichtungszeiten mit den dazugehörigen Blendenwerten vorgenommen. Abschließend wählt man ein entsprechendes Wertepaar (Belichtungszeit — Blendenwert) aus und stellt den Fotoapparat danach ein. ②

Die Einstellung der Lichtempfindlichkeit wird für den gleichen Film nur einmal vorgenommen. Technisch gut ausgerüstete Fotoapparate sind mit einer Belichtungsautomatik versehen. Sie garantiert die richtige Belichtung jeder Aufnahme. Grundlage der Belichtungsautomatik in den PENTACON-Fabrikaten ist die Innenlichtmessung mit Strahlenteiler, Lichtkonzentrator und Fotowiderstand. Der Vorteil besteht darin, daß nur das Licht gemessen wird, das unmittelbar am Bildaufbau beteiligt ist. Zumeist wird die richtige Belichtung im Sucherbild durch Zeigerausschlag oder Leuchtdioden signalisiert. ③④

Das Filmmaterial. Das Filmmaterial setzt sich aus dem Schicht- oder Emulsionsträger und der darauf aufgebrachtten lichtempfindlichen Schicht zusammen. Diese lichtempfindliche Schicht ist eine Emulsion feiner Silberhalogenidkristalle in Gelatine. Man unterscheidet zwischen fotografischen Platten und Filmen. Für die Filme verwendet man als Unterlage einen sehr schwer entflammaren Kunststoff (Sicherheitsfilm). Der Film wird als Rollfilm unterschiedlicher Breite hergestellt und ist vom Hersteller lichtdicht verpackt.

In der Fotografie unterscheidet man je nach dem, welche Rolle das fotografische Material im Entwicklungsprozeß spielt, zwischen

- a) dem Negativfilm und
- b) dem Umkehrfilm.

Auf dem Negativfilm erscheinen nach dem Entwickeln die umgekehrten Helligkeitswerte des Aufnahmeobjekts. Ein heller Gegenstand (Objekt) ruft, bedingt durch die starke Reflexion des Lichts, eine starke Belichtung auf dem Film hervor. Nach dem Entwickeln des Films zeigt sich an dieser Stelle eine Schwärzung der lichtempfindlichen Schicht.

Der Einsatz des Umkehrfilms gestattet Aufnahmen, die nach Entwickeln des Films Positivbilder ergeben. Die auf dem entwickelten Film gespeicherten Bilder stimmen bei richtiger Belichtung mit den Helligkeitswerten des aufgenommenen Objektes überein. Ein helles Objekt erscheint somit auch auf dem Filmmaterial hell. Bei diesem Verfahren wird jeweils nur ein Originalpositiv erzeugt. Es findet breite Anwendung in der Kinematographie (Kino), sowohl in den Heimkinos für 8 mm und 16 mm Filme als auch in den Lichtspieltheatern für 35 mm und 70 mm Filme. Auch die Herstellung von Diapositiven beruht auf diesem Verfahren. Die beiden Filmmaterialien, der Negativfilm und der Umkehrfilm, werden sowohl als Schwarzweißfilme als auch als Farbfilme hergestellt. Während der Schwarzweißfilm nur Helligkeitsunterschiede wiedergibt, erwartet man vom Farbumkehrfilm die naturgetreue Wiedergabe der einzelnen Farben. ⑤

-
- ① Informieren Sie sich über den Verschluß verschiedener Fotoapparate und demonstrieren Sie diese im Experiment!
 - ② Vergleichen Sie verschiedene gemessene Werte mit den im Bild 182/2 angegebenen Werten!
 - ③ Nehmen Sie Einstellungen am fotoelektrischen Belichtungsmesser vor und wählen Sie entsprechende Wertepaare aus!
 - ④ Informieren Sie sich anhand von Prospekten über die Belichtungsautomatik der handelsüblichen Fotoapparate!
 - ⑤ Vergleichen Sie das Bild und den Negativfilm einer Aufnahme!

Die Lichtempfindlichkeit. Das von den Objekten ausgehende Licht bestimmt die Einstellung der Blende und der Belichtungszeit. Bei gleicher Beleuchtung des Objektes hat die Änderung des Blendenwertes die Änderung der Belichtungszeit zur Folge. Eine weitere Möglichkeit, Einfluß auf die Einstellung der Blende sowie der Belichtungszeit zu nehmen, kann durch die Wahl der verschiedenen lichtempfindlichen Filme erfolgen. Die Lichtempfindlichkeit eines Films wird je nach Herstellerland in DIN, FOCT oder ASA angegeben. Sie zeigt an, ob für das Belichten des Films viel oder wenig Licht benötigt wird. Die Werte für die Lichtempfindlichkeit sind auf den Packungen angegeben.

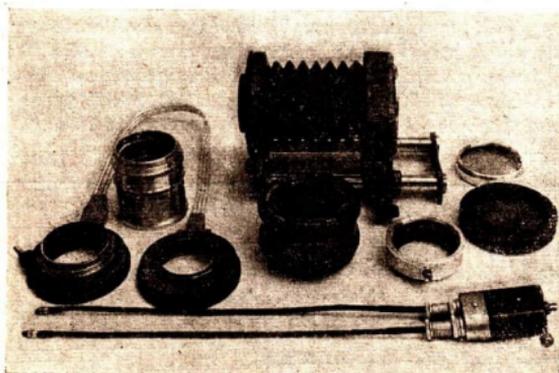
Überblick über die vorwiegend im Handel erhältlichen Filme:

Angabe der Empfindlichkeit	Schwarzweißfilme				Farbfilme			
	DIN	FOCT	ASA					
DIN	15	20	22	27	17	18	19	20
FOCT	22	65	130	360	32	45	65	65
ASA	25	80	125	400	40	50	64	80

Die Lichtempfindlichkeit von 27 DIN bzw. 360 FOCT ist sehr hoch und die Lichtempfindlichkeit von 15 DIN bzw. 22 FOCT ist niedrig. ①

3. Anwendungen der Fotografie

Die Fotografie besitzt einen großen Anwendungsbereich. Sie ist nicht nur eine Freizeitbeschäftigung des Fotoamateurs oder dient als Erwerbsgrundlage für den Berufsfotografen, sondern hilft auch in der Wissenschaft und der Technik neue Erkenntnisse zu gewinnen. Man unterscheidet zwischen der **normalen Fotografie**, der **Makrofotografie** und der **Mikrofotografie**. Die Makrofotografie umfaßt die Nah- und Lupenaufnahmen. Sie liegt zwischen der Mikrofotografie und der normalen Fotografie. Unter dem Begriff Makrofotografie versteht man also Aufnahmeverfahren zur Wiedergabe



184/1
Zusatzgeräte für den Fotoapparat

kleinerer Objekte bei geringer Vergrößerung. In der Makrofotografie kommen Zusatzgeräte zum Fotoapparat, wie Zwischenringe, Balgennaheinstellgerät oder Lupen zum Einsatz (Bild 184/1). Die Mikrofotografie dient zur Aufnahme mikroskopischer Bilder. Hierfür werden außer dem Fotoapparat mikrofotografische Geräte benötigt. ②

Fotografie zur Landkartengestaltung

Zur Gestaltung von Landkarten werden Luftbildaufnahmen von Ortschaften oder größeren Gebieten angefertigt. Diese gestatten eine schnelle und genaue kartografische Auswertung (vgl. Atlas, S. 1).

Da die Karte möglichst viele Informationen enthalten soll, müssen die Luftbildaufnahmen Einzelheiten der Landschaft erkennen lassen. Man sagt, sie besitzen ein hohes Auflösungsvermögen. Luftbildaufnahmen werden häufig mit einer Weitwinkelkamera angefertigt. Mit dieser Weitwinkelkamera erhält man z. B. bei einer Flughöhe von 3000 m ein Meßbild mit dem mittleren Maßstab 1:20000 (bei $f = 150$ mm). Die Kamera ist mit einer Filmkassette ausgerüstet, die 150 m Rollfilm aufnimmt. Damit können über 500 Aufnahmen mit einem Bildformat von 23 cm \times 23 cm angefertigt werden, ohne daß die Kassette gewechselt wird. Die Aufnahme der Luftbilder erfordert gute Witterungsbedingungen.

Die Anwendung dieses Verfahrens stellt einen bedeutenden ökonomischen Faktor dar. Neben der genauen Vermessung von Gebieten sowie der exakten Anfertigung von Landkarten ergibt sich der ökonomische Vorteil durch die schnelle Bearbeitung großer Flächen. Dadurch ist es möglich, die Landkarten, die durch die schnelle Entwicklung und Veränderung der Städte, der Industrie und der Landschaft schnell veralten, ständig dem neuesten Stand anzupassen.

Fotografie in der Medizin

Durch die rasche Entwicklung der technischen Hilfsmittel der Fotografie (Beleuchtungsgeräte, Kleinbildfilm, Erhöhung der Filmempfindlichkeit, Zusatzgeräte für Makro- und Mikrofotografie) wurde diese zur wertvollen Hilfe für die medizinische Forschung und Behandlung. In der Medizin stellt man hohe Anforderungen an exakte fotografische Abbilder der einzelnen Krankheitssymptome und -verläufe. Bildgestalterische Elemente sind hier von untergeordneter Bedeutung. Die medizinische Fotografie weist entsprechend der Fachdisziplinen Besonderheiten auf. So kann man z. B. zwischen der **Operationsfotografie**, der **Kolpofotografie**, der **endoskopischen Fotografie**, der **Mikrofotografie** u. a. unterscheiden.

Die Operationsfotografie (Bild 186/1) gehört zu dem Bereich der normalen Fotografie. Sie erfolgt während einer Operation im Operationssaal und dient vor allem für Unterrichts- und Lehrzwecke sowie für Publikationen. Die Aufnahmen werden vorwiegend in Farbe vorgenommen. Dadurch können wichtige Details des chirurgischen Eingriffs

-
- ① Erweitern Sie Ihre Kenntnisse über das Fotografieren anhand des Buches W. Wurst: Foto-buch für alle, VEB Fotokinoverlag Leipzig 1979.
 - ② Fotografieren Sie Blumenblüten, indem Sie zusätzlich Lupen, Zwischenringe oder ein Balgennaheinstellgerät verwenden! Beachten Sie die Hinweise beim Einsatz von Zwischenringen oder des Balgennaheinstellgerätes!



besser erkannt werden. Von der Operationsfotografie wird gefordert, daß die Abbildung des Operationsfeldes unter dem Gesichtswinkel des Operateurs erfolgen soll, die richtige Ausleuchtung der Organe vorgenommen sowie die Sterilität gewahrt wird. Ein Operationsverlauf kann durch eine chronologische Bildfolge festgehalten werden. Unter der **Kolpofotografie** versteht man alle Arten der medizinischen Lupenaufnahmen. Besonders in der fotografischen Wiedergabe von Körperhöhlenbefunden wird dieses Verfahren eingesetzt. Mit dieser Technik ist es leicht möglich, Aufnahmen der Haut, der Zähne und der Mundhöhle, des Kehlkopfes sowie des Auges vorzunehmen. Neben dem Festhalten einzelner Stadien eines Krankheitsablaufes haben sich kolpofotografische Aufnahmen für die Reihenuntersuchungen bewährt. Das Untersuchungsobjekt wird mit einer leistungsfähigen Lichtquelle beleuchtet und durch eine vergrößernde Optik (Lupe) betrachtet bzw. fotografiert.

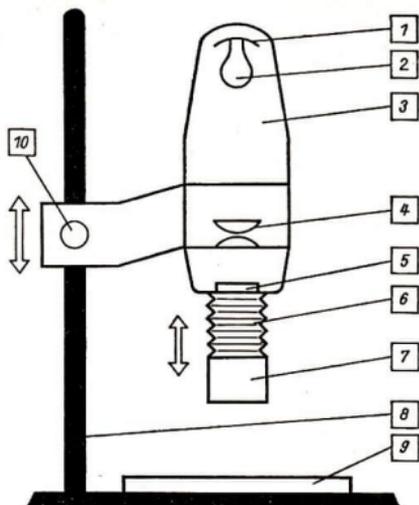
Bei der **endoskopischen Fotografie** verwendet man lange, dünne Rohre, die mit einem Linsensystem und einer Lichtquelle versehen sind. Sie werden direkt in das Körperinnere eingeführt. An die Endoskopoptik wird die Forderung einer gleichmäßig scharfen Abbildung sowohl in der Breite als auch in der Tiefe des zu untersuchenden Objektes gestellt. Ein Anwendungsbeispiel ist die Fotografie der Bronchien.

Das Vergrößerungsgerät

Es dient zur Vervielfältigung von Aufnahmen, die auf dem Negativfilm enthalten sind und kann sowohl für die Vergrößerung als auch Verkleinerung der Aufnahmen eingesetzt werden. Im Fotolabor wird es fast ausschließlich zur Vergrößerung verwendet. Der prinzipielle Aufbau ist aus Bild 187/1 zu erkennen. Die Arbeitsweise ist wie folgt: Das von der Projektionslampe ausgehende Licht wird durch das Gehäuse begrenzt. Nur durch den Kondensator gelangt das Licht zur Negativbühne. Der Kondensator besteht aus zwei plankonvexen Linsen und hat die Aufgabe, die Negativbühne gleichmäßig auszuleuchten. Das wird erreicht durch das Verstellen der Glühlampe zum Kondensator. Zur besseren Ausnutzung des Lichts ist außerdem noch ein Hohlspiegel eingebaut. Auf die Negativbühne wird der Film aufgelegt. Die beschichtete Seite des Films zeigt zum Objektiv. Der Negativfilm befindet sich dabei innerhalb der doppelten,

187/1 Aufbau eines Vergrößerungsgerätes

- 1 – Hohlspiegel
- 2 – Projektionslampe
- 3 – Gehäuse
- 4 – Kondensator
- 5 – Negativbühne
- 6 – Faltenbalg
- 7 – Objektiv
- 8 – Stativ
- 9 – Vergrößerungskassette
- 10 – Verstellknopf



aber außerhalb der einfachen Brennweite. Das den Film durchstrahlende Licht gelangt durch das Objektiv in Vertikalrichtung wird ein scharfes Bild auf der Vergrößerungskassette eingestellt. Je näher der Negativfilm an den Brennpunkt rückt, desto größer wird das projizierte Bild. Auch hier gilt die Gleichung (4). ① ②

Zum besseren Einstellen der Schärfe legt man zunächst ein Blatt weißes Papier auf die Vergrößerungskassette. Danach wird das Papier gegen das Fotomaterial ausgetauscht. Wird die gleiche Vergrößerung beibehalten, erfolgt das Einstellen der Schärfe für den gesamten Film nur einmal. Ändert man die Vergrößerung, muß auch das Scharfeinstellen neu vorgenommen werden. ③

Das Vergrößerungsgerät ist über eine Kurzzeituhr an das Netz angeschlossen. Die Kurzzeituhr ermöglicht das Einstellen und Auslösen verschiedener Belichtungszeiten. Das ist notwendig, da das Filmmaterial zumeist unterschiedlich belichtet ist, und weil durch verschiedene Einstellungen am Vergrößerungsgerät mehr oder weniger Licht auf das Positivmaterial (Fotopapier) trifft. Außerdem kann mit einer im Objektiv eingebauten Irisblende die Strahlungsintensität des Lichts eingestellt werden.

Bei vielen Vergrößerungsgeräten sind zusätzlich Rotfilter angebracht, die gegebenenfalls in den Strahlengang eingeschoben werden können. Dies wird zum Beispiel dann notwendig, wenn das Positivmaterial auf der Kassette liegt und bei eingeschaltetem Vergrößerungsgerät eine Korrektur vorgenommen werden muß. Positivmaterialien sind für Rotlicht unempfindlich.

Das Vergrößerungsgerät ist in jedem Fotolabor zur Herstellung von fotografischen Bildern zu finden. Die Aufstellung erfolgt in einem verdunkelten Raum (Dunkelkammer), da die Fotomaterialien lichtempfindlich sind. Lediglich eine spezielle Dunkel-

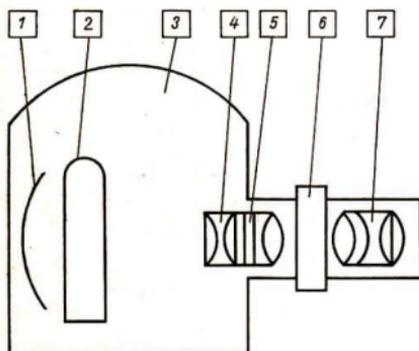
- ① Informieren Sie sich über das in der Arbeitsgemeinschaft existierende Vergrößerungsgerät!
- ② Berechnen Sie die Entfernung zwischen Objektiv und Vergrößerungskassette, wenn der Abstand Objektiv – Filmebene 6 cm und die Brennweite des Objektivs 55 mm betragen!
- ③ Bauen Sie aus Aufbauteilen ein Vergrößerungsgerät auf und demonstrieren Sie einige Einstellungen (PSV 7, V 3.3.2. b)!

kammerleuchte mit einem Orwo-Schutzfilter (113 J oder D) sorgt für eine hinreichende Beleuchtung. Diese Beleuchtung ruft keine fotochemischen Veränderungen auf dem Fotopapier hervor.

Die Herstellung von fotografischen Vergrößerungen ist relativ einfach. Nach dem Belichten des Fotopapiers wird dieses in einem Entwicklerbad entwickelt, dann gewässert und in einem Fixierbad fixiert. Nach dem Fixieren erfolgt eine nochmalige Wässerung und der Trocknungsprozeß. Dieser kann durch Lufttrocknung oder mittels elektrischen Trockenpressen vorgenommen werden. Für die Entwicklung von Fotopapieren verwendet man einen Papierentwickler, z. B. Orwo N 113, der in einer Entwicklerschale in Wasser gelöst wird. Das Fixieren des entwickelten Materials erfolgt z. B. mit Orwo Fixiersalz A 300.

Der Diaprojektor

Sein prinzipieller Aufbau ist aus Bild 188/1 ersichtlich und gleicht dem des Vergrößerungsgerätes. Das zu durchstrahlende Dia befindet sich ebenfalls innerhalb der doppelten, aber außerhalb der einfachen Brennweite. ①



188/1 Aufbau eines Diaprojektors

- 1 – Hohlspiegel
- 2 – Projektionslampe
- 3 – Gehäuse
- 4 – Kondensator
- 5 – Wärmeschutzfilter
- 6 – Diapositiv
- 7 – Objektiv

Die Wirkungsweise ist, abgesehen von einigen technischen Veränderungen, bei allen Typen von Diaprojektoren gleich. Das von der Projektionslampe ausgehende Licht durchstrahlt nacheinander den Kondensator, das Diapositiv und das Objektiv und trifft in einiger Entfernung auf die aufgestellte Projektionswand.

Je nach dem Verwendungszweck kann man zwischen Saal- und Heimprojektoren unterscheiden. Die Saalprojektoren besitzen auf Grund der größeren Entfernung zwischen Objektiv und Projektionswand eine größere Lichtleistung als die Heimprojektoren. Dadurch wird auch viel Wärme von der Projektionslampe erzeugt, die für die Diapositive schädlich ist. Deshalb ist in Saalprojektoren ein Ventilator eingebaut, welcher die Wärme nach außen abführt. Bei Heimprojektoren mit geringerer Lichtleistung genügt das eingebaute Wärmeschutzfilter. Dieses befindet sich zwischen den Kondensatorlinsen. Große Anforderungen werden außer an die Lichtquelle auch an den Kondensator und das Objektiv gestellt. So werden auch für große Projektionsentfernungen eine gute Bildhelligkeit sowie ein scharfes und verzerrungsfreies Bild gefordert. Bei einigen Projektoren können die Objektive den spezifischen Bedingungen der Projektionsentfernung entsprechend ausgewechselt werden. Das Scharfeinstellen des Bildes auf der Projektionswand erfolgt wie beim Fotoapparat durch die Lageänderung des Objektivs.

Sehr variabel sind die Bildtransporter der einzelnen Projektoren ausgestattet. Diese reichen vom Einzelbild-Wechselschieber mit manueller Bedienung über halbautomatische Einzelbildfolge bis zur automatischen Steuerung durch Zuschalten eines Tonbandgerätes und eines Synchronisators. Das hierfür verwendete Tonband enthält neben dem Kommentar für die Dias Steuersignale, welche über den Synchronisator den Bildtransporter in Funktion setzen. ②③④⑤

4. Fernrohre und Mikroskope

Das Linsenfernrohr

Die Erfindung des Linsenfernrohres erfolgte wahrscheinlich zu Beginn des 16. Jahrhunderts, obwohl die Voraussetzungen durch die Herstellung von Linsen schon seit der Antike gegeben waren. Es ist anzunehmen, daß erst durch die Erfindung der Brille ein bedeutender Schritt hierfür getan wurde.

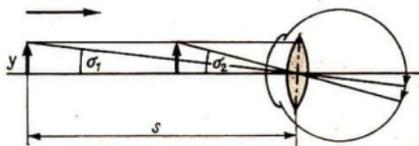
Galileo Galilei (1564 bis 1642) baute nach Bekanntwerden der Erfindung des Fernrohres 1609 das erste Linsenfernrohr in Italien. Mit diesem Fernrohr erreichte er zunächst eine dreifache, dann eine achtfache und schließlich eine dreißigfache Vergrößerung. Im Jahre 1611 baute Johannes Kepler (1571 bis 1630) ein Fernrohr, mit dem es möglich war, die zu betrachtenden Gegenstände auch zu vermessen.

Nach ihrer Bauart unterscheidet man zwischen

- dem holländischen oder Galileischen Fernrohr,
- dem astronomischen oder Keplerschen Fernrohr,
- dem terrestrischen oder Erdfernrohr.

Wird ein Gegenstand mit dem Fernrohr beobachtet, dann erscheint es so, als ob man sich diesem Gegenstand genähert hätte. In Wirklichkeit hat sich aber der **Sehwinkel** geändert. Das soll am Beispiel erläutert werden. Betrachtet man mit dem bloßen Auge einen Gegenstand aus verschiedenen Entfernungen, dann erscheint dieser kleiner, wenn die Entfernung größer bzw. größer, wenn die Entfernung kleiner geworden ist.

189/1 Zur Definition des Sehwinkels



- ① Bauen Sie das Modell eines Diaprojektors auf und setzen Sie Sammellinsen mit unterschiedlichen Brennweiten ein! Zeigen Sie, daß die Gleichung (4) gilt!
- ② Beschreiben Sie die Einzelteile des schuleigenen Diaprojektors!
- ③ Wie muß man ein Dia einlegen, damit auf der Projektionswand ein fotografiertes Text richtig projiziert wird?
- ④ Bauen Sie die automatische Dia-Ton-Projektionseinrichtung auf und führen Sie eine Bildreihe vor!
- ⑤ Wie groß wird das Bild eines Dias von $24 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$ in einer Entfernung von 3 m , wenn das Objektiv des Diaprojektors eine Brennweite von 80 mm besitzt? (Hinweis: Erst Gegenstandsweite berechnen!)

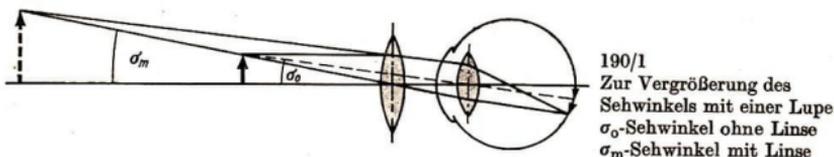
Dabei hat sich der Winkel, unter dem der Gegenstand betrachtet wird, verändert (Bild 189/1), man nennt diesen Winkel den

Schwinkel σ .

Der Winkel σ , unter dem man einen Gegenstand betrachtet, heißt Schwinkel.

$$\tan \sigma = \frac{y}{s}$$

Hieraus geht hervor, daß der Schwinkel auf zweierlei Art vergrößert werden kann, und zwar a) durch Vergrößern des Gegenstandes und b) durch Verkürzen der Entfernung.



Man erkennt im Bild 190/1, daß bei gleicher Größe des Gegenstandes und gleicher Entfernung vom Auge der Schwinkel durch Einsatz einer Lupe weiter vergrößert werden kann. Das bedeutet, daß es sich bei der Vergrößerung mit optischen Instrumenten für den subjektiven Gebrauch stets um eine **Winkelvergrößerung** handelt. ①

In den folgenden Abschnitten wird auf diesen Schwinkel eingegangen. Bei der Behandlung des Strahlenverlaufs an optischen Instrumenten wurde das Auge aus Gründen der Vereinfachung nicht eingezeichnet. Es wird aber darauf hingewiesen, daß das Auge bei allen subjektiven Betrachtungen mit einbezogen werden muß.

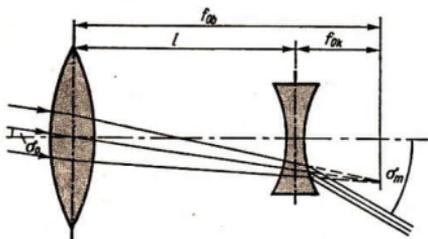
Das Galileische Fernrohr

Es besteht aus einer Sammellinse (Objektiv) und einer Zerstreuungslinse (Okular). Beide Linsen sind so angeordnet, daß ihr bildseitiger Brennpunkt zusammenfällt. Treffen parallele Lichtstrahlen aus großer Entfernung auf die Sammellinse, so würde ein reelles Bild erzeugt werden. Da sich jedoch in diesem Strahlenverlauf eine Zerstreuungslinse befindet, verlassen die Strahlen das Okular wieder parallel (Bild 190/2). In diesem Fall spricht man von einem brennpunktlosen Strahlengang.

6

▼ Demonstrieren Sie den Strahlenverlauf in einem Galileischen Fernrohr nach PSV 7, V 3.4.14.!

Für die Zerstreuungslinse ist das vom Objekt erzeugte Bild ein virtuelles Objekt. Aus



190/2 Strahlenverlauf am Galileischen Fernrohr

der Anordnung der beiden Linsen ergibt sich die Länge des Fernrohres. Sie ist gleich der Differenz der beiden Brennweiten von Objektiv (f_{ob}) und Okular (f_{ok}).

Beim Galileischen Fernrohr ist der Abstand l des Objektivs vom Okular gleich der Differenz der beiden Brennweiten f_{ob} und f_{ok}	$l = f_{ob} - f_{ok}$ (6)
---	---------------------------

Das Fernrohr wird mit entspanntem Auge benutzt. Die mit dem Galileischen Fernrohr betrachteten Objekte erscheinen aufrecht und seitenrichtig. Aus Bild 190/2 ist zu erkennen, daß der Sehwinkel ohne Fernrohr σ_0 kleiner ist als der Sehwinkel mit Fernrohr σ_m . Daraus läßt sich die Vergrößerung V berechnen.

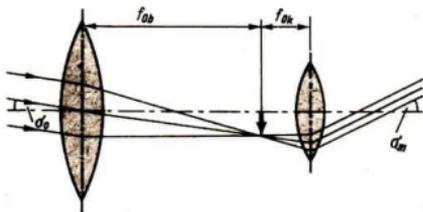
Da für das Okular eine Zerstreuungslinse mit einer negativen Brennweite verwendet wird, setzt man für f_{ok} nur den Betrag ein. Man erhält dann: (2)

Vergrößerung	$V = \frac{f_{ob}}{ f_{ok} }$ (7)
--------------	-----------------------------------

Das Keplersche Fernrohr

Es besitzt ein sammelndes Objektiv und ein sammelndes Okular. Aus Bild 191/1 ist zu erkennen, daß das Objektiv ein reelles und umgekehrtes Zwischenbild vom Objekt erzeugt. Die zweite Linse, das Okular, wird so angeordnet, daß der bildseitige Brennpunkt des Objektivs mit dem gegenstandsseitigen Brennpunkt des Okulars zusammenfällt. Damit übernimmt das Okular die Funktion einer Lupe. (3) (4)

191/1
Strahlenverlauf am Keplerschen Fernrohr



Die Länge des Fernrohres ergibt sich aus der Summe der beiden Brennweiten.

- ① Informieren Sie sich anhand des LB Bio 8 über den Aufbau des Auges! Verwenden Sie dazu das Modell aus dem Biologieunterricht!
- ② Fertigen Sie aus zwei Brillengläser ein Galileisches Fernrohr an!
- ③ Beschreiben Sie die vom Fernrohr erzeugten Bilder!
- ④ Demonstrieren Sie den Strahlenverlauf in einem Keplerschen Fernrohr und verändern Sie die Gegenstandsweite!

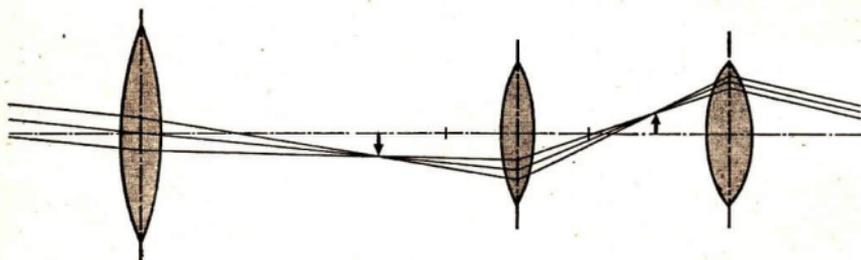
Beim Keplerschen Fernrohr ist der Abstand l des Objektivs vom Okular gleich der Summe der beiden Brennweiten f_{ob} und f_{ok} .

$$l = f_{ob} + f_{ok} \quad (8)$$

Die Vergrößerung V des Keplerschen Fernrohres ergibt sich ebenfalls aus dem Quotienten der Brennweiten von Objektiv und Okular. Für die Vergrößerung gilt Gleichung (7). ①②③④

Das Erdfernrohr

Während sich beim Keplerschen Fernrohr die Umkehrung des Bildes beim Betrachten von Objekten auf der Erde störend bemerkbar macht, besitzt das Galileische Fernrohr bei gleicher Vergrößerung wie das Keplersche Fernrohr ein kleineres Sichtfeld. Deshalb entwickelte Kepler ein Fernrohr, welches drei Sammellinsen besitzt. Die Anordnung der Sammellinsen ist aus Bild 192/1 ersichtlich. Zwischen dem Objektiv und dem Okular ist eine sogenannte Umkehrlinse eingebaut. Da die doppelten Brennweiten der Umkehrlinse mit der einfachen Brennweite des Objektivs sowie des Okulars zusammenfallen, erfüllt sie nur die Funktion der Bildumkehrung. ⑤⑥



192/1 Strahlenverlauf am Erdfernrohr

Durch die Anordnung der Umkehrlinse erhält das Erdfernrohr eine unbehagliche Länge. Diese ergibt sich, wie in Bild 192/1 zu ersehen ist aus: $l = f_{ob} + 4 \cdot f_{umk} + f_{ok}$. Die Bildumkehrung beim Erdfernrohr kann außer mit einer Sammellinse auch durch totalreflektierende Prismen oder durch Spiegel erreicht werden. ⑦⑧

Anwendungen der Fernrohre

Fernrohre werden heutzutage nicht nur für die Beobachtung von Himmelskörpern oder in der Seeschifffahrt eingesetzt. Sie finden einen breiten Anwendungsbereich sowohl im Militärwesen als auch in verschiedenen Bereichen der Technik. So werden z. B. im militärischen Bereich Prismenfernrohre als Beobachtungs- sowie Zielfernrohre eingesetzt. Die hier eingebauten Prismen dienen als Reflexionsprismen unter Ausnutzung der Totalreflexion. Die Ausführung erfolgt zumeist als Doppelfernrohr. Für spezielle Aufgaben werden unterschiedliche Bauformen, wie z. B. das Scheren-

fernrohr oder das Periskop (auch Sehrohr), eingesetzt. Das Periskop wird vor allem für die Beobachtung aus dem getauchten U-Boot verwendet. Hierfür wird das Sehrohr bis zur Wasseroberfläche ausgefahren. Durch Drehung des Oberteils kann der gesamte Horizont beobachtet werden. Dabei bleibt das Okular in Ruhe.

In der Industrie setzt man Fluchtungsprüferröhre zu Justierarbeiten im Werkzeugmaschinenbau und Großmaschinenbau ein. Mit diesen Fernrohren kann festgestellt werden, ob eine Anzahl von in verschiedenen Entfernungen angebrachten Marken miteinander fluchten. Damit lassen sich Abweichungen von der Fluchtung, d. h. die gegenseitige Parallelverschiebung in festgelegten Ebenen, ermitteln. Für die Überprüfung von Abweichungen von der Richtung setzt man Richtungsprüferröhre ein. Damit stellt man die gegenseitige Winkelneigung, z. B. der Achsen zweier Maschinen, fest. Beide Fernrohre findet man auch in einem Gerät vereinigt. ⑨

Das Mikroskop

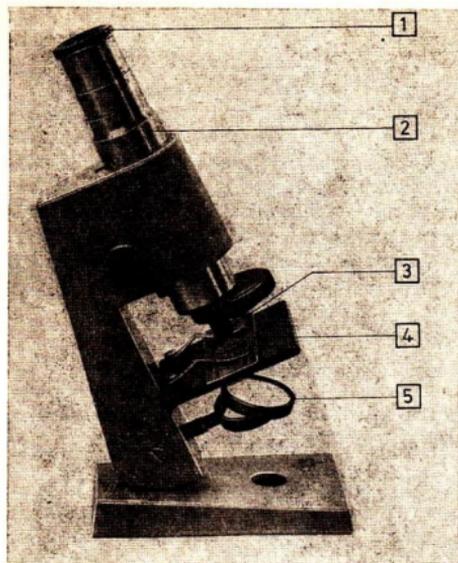
Mit dem Mikroskop können kleine Gegenstände unter einem größeren Sehwinkel betrachtet werden. Es besteht wie das astronomische Fernrohr aus einem sammelnden Objektiv und einem sammelnden Okular. ⑩

Im Gegensatz zum Fernrohr befindet sich beim Mikroskop der Gegenstand (Objekt) nicht sehr entfernt vom Objektiv, sondern zwischen F_1 und $2 \cdot F_1$. Außerdem fallen nicht wie beim Keplerschen Fernrohr die beiden Brennpunkte des Objektivs und des Okulars zusammen, sondern haben einen Abstand voneinander, welcher optische Tubuslänge genannt wird. Bild 194/1a zeigt den Aufbau und Bild 194/1b den Strahlenverlauf eines Mikroskopes. Das Objektiv erzeugt ein vergrößertes, reelles Zwischenbild, welches mit dem Okular wie mit einer Lupe betrachtet wird. ⑪

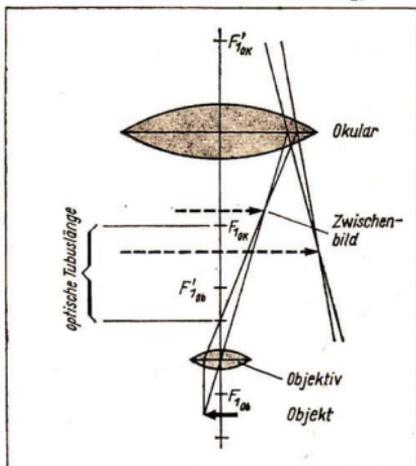
Die Normalvergrößerung eines Mikroskopes ergibt sich aus dem Produkt der beiden Vergrößerungen von Objektiv und Okular:

$$V = V_{\text{ob}} \cdot V_{\text{ok}} \quad (9)$$

-
- ① Bauen Sie das Modell eines Keplerschen Fernrohres auf und berechnen Sie die Vergrößerung (PSV 7, V 3.4.7.; V 3.4.12.)!
 - ② Betrachten Sie ein Objekt nacheinander mit dem Galileischen und dem Keplerschen Fernrohr und arbeiten Sie die Unterschiede heraus!
 - ③ Welche Vergrößerung erzeugt ein Fernrohr, wenn die Brennweite des Objektivs mit +120 cm und die des Okulars mit +20mm angegeben wird?
 - ④ Überlegen Sie, welche Möglichkeiten es beim Keplerschen Fernrohr gibt, das Bild aufrecht und seitenrichtig zu erzeugen!
 - ⑤ Bauen Sie das Modell eines Erdfernrohres auf und weisen Sie nach, daß durch den Einsatz der Umkehrlinse keine weitere Vergrößerung auftritt (PSV 7, V 3.4.9.)!
 - ⑥ Warum muß man das Okular der Fernrohre verstellen können?
 - ⑦ Wieviel Prismen muß ein Prismenfernrohr mindestens besitzen, damit das durch die Sammellinse entstandene seitenvertauschte und umgekehrte Bild wieder aufrecht und seitenrichtig erscheint?
 - ⑧ Demonstrieren Sie die Wirkungsweise eines Prismenfernrohres (PSV 7, V 3.4.10.)!
 - ⑨ Fertigen Sie Aufnahmen an, in dem Sie vor das Objektiv Ihres Fotoapparates ein Fernrohr setzen!
 - ⑩ Welche Bilder erzeugt das Mikroskop?
 - ⑪ Demonstrieren Sie den Strahlenverlauf in einem Mikroskop (PSV 7, V 3.4.18.)!



194/1 a Aufbau eines Mikroskopes
 1 – Okular 2 – Tubus 3 – Objektiv
 4 – Objektträger 5 – Spiegel
 b Strahlenverlauf am Mikroskop



Für die Vergrößerung des Objektivs gilt:

$$V_{\text{ob}} = l / f_{\text{ob}}, \quad (10)$$

hierbei ist l der Abstand zwischen den inneren Brennpunkten f_{ob} und f_{ok} (optische Tubuslänge). Die Vergrößerung des Okulars ist durch $V_{\text{ok}} = \frac{s}{f_{\text{ok}}}$ gegeben. Für s ist die deutliche Sehweite des Auges einzusetzen. Sie beträgt beim normalsichtigen Auge 25 cm. Durch Einsetzen in die Gleichung erhält man:

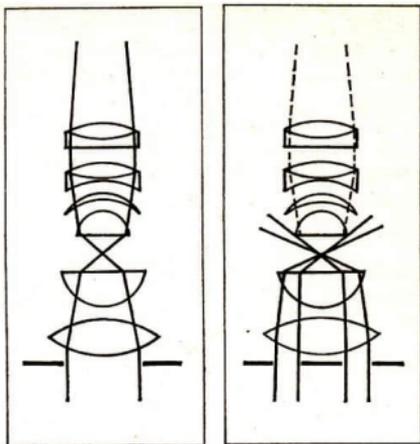
$$V = \frac{25 \text{ cm} \cdot l}{f_{\text{ok}} \cdot f_{\text{ob}}} \quad (\text{für das normalsichtige Auge}). \quad (1)$$

Bei vielen Mikroskopen kann die Vergrößerung durch Auswechseln der Objektive und Okulare verändert werden. Hierbei verändert sich die optische Tubuslänge. Das hat keine Bedeutung für den Benutzer des Mikroskopes. Neben der optischen Tubuslänge kennt man noch die mechanische Tubuslänge. Das ist der Abstand von der Anlagefläche der Objektive bis zur Okularauflage. (2③)

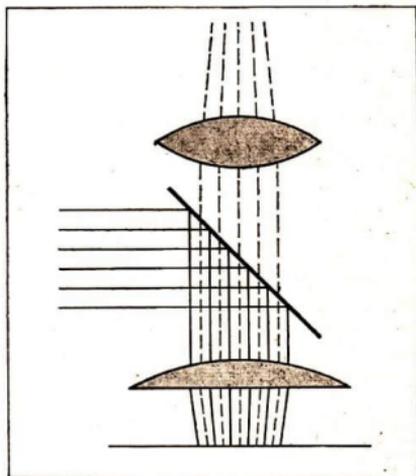
Die Beleuchtungsarten. Die Beleuchtung des zu untersuchenden Objektes ist für ein gutes Mikroskopieren von Bedeutung. In der Mikroskopie sind verschiedene Beleuchtungsarten bekannt. Man unterscheidet zwischen der **Hellfeld- und Dunkelfeldmikroskopie**. Beide Arten sind für die **Durchlicht- und Auflichtbeleuchtung** geeignet. Die Hellfeldbeleuchtung liegt dann vor, wenn das beleuchtende Licht in das Objektiv gelangt (Bild 195/1). Bei der Hellfeldmikroskopie erscheinen die Objektive dunkel oder farbig auf hellem Grund. Dringt dagegen nur das vom Objekt gebeugte Licht (vgl. Seite 199) in das Objektiv ein, so liegt eine Dunkelfeldbeleuchtung vor (Bild 195/2).

195/1 Durchlichthellfeldbeleuchtung (links)

195/2 Durchlichtdunkelfeldbeleuchtung (rechts)

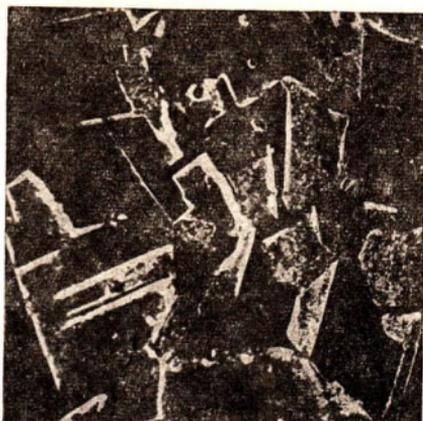


Bei der Dunkelfeldmikroskopie erscheinen die Objekte hell auf dunklem Grund. Werden lichtdurchlässige Objekte im Mikroskop betrachtet, dann spricht man von der Durchlichtmikroskopie. Hierfür eignen sich alle dünnen Objekte, wie z. B. Schnittpräparate, Wasserorganismen usw. Dagegen spricht man von Auflichtmikroskopie, wenn das Licht an der Oberfläche von lichtdurchlässigen oder lichtundurchlässigen Objekten reflektiert wird (Bild 195/3). Bild 196/1 zeigt zwei Aufnahmen eines Metallschliffes im Auflichtverfahren, sowohl für Hellfeld- als auch für Dunkelfeldbeleuchtung. ④



195/3 Auflichthellfeldbeleuchtung

- ① Welche Vergrößerung besitzt ein Mikroskop, wenn die Brennweite des Objektivs 5 mm, die Brennweite des Okulars 20 mm und die optische Tubuslänge 10 cm beträgt?
- ② Weisen Sie experimentell an einem Schulmikroskop nach, daß Objektiv und Okular sammelnde Systeme sind!
- ③ Bauen Sie das Modell eines Mikroskopes auf und berechnen Sie die Normalvergrößerung (PSV 7, V 3.4.17.)!
- ④ Erproben Sie mit dem Schulmikroskop die Beleuchtungsarten beim Mikroskopieren!



196/1 Mikroaufnahme einer Kupfer-Nickel-Legierung in 500facher Vergrößerung

a) Hellfeldbeleuchtung

b) Dunkelfeldbeleuchtung

Die gebräuchlichste Methode ist die Hellfeldmikroskopie, die im Durchlichtverfahren häufig die Anwendung von Färbemethoden verlangt. Ursache hierfür ist die geringe Schwächung des Lichts im Objekt. Dadurch verringert sich die Kontrastwirkung und die Einzelheiten sind schlecht erkennbar. Das trifft vor allem für biologische und medizinische Objekte zu. Die Dunkelfeldmikroskopie wird zum Beobachten sehr feiner, vereinzelter Objekte, z. B. Bakterien, angewandt.

Die Mikrofotografie. Unter der Mikrofotografie versteht man Fotografie im vergrößerten Abbildungsmaßstab durch ein mehrstufig vergrößerndes optisches System. Sie dient zur Herstellung fotografischer Aufnahmen von mikroskopischen Bildern. Die vergrößerte Wiedergabe der Aufnahmen in der Abbildungsebene (Filmebene) liegt zwischen 25:1 und 1500:1. Eine weitere Vergrößerung kann nach dem Entwickeln des Films mit dem Vergrößerungsgerät erfolgen. Die Einrichtung für eine mikrofotografische Aufnahme setzt sich generell aus drei Grundgeräten zusammen, und zwar aus a) der Beleuchtungseinrichtung mit der Lichtquelle, b) dem Mikroskop und c) dem Fotoapparat mit dem entsprechenden Zubehör. An die Lichtquelle stellt man sehr hohe Anforderungen (ausreichende Leuchtdichte bei relativ kleiner, möglichst gleichmäßig lichtspendender Fläche mit erträglicher Wärmeentwicklung). Hierfür kommen heute hauptsächlich elektrische Lichtquellen in Frage. Die für die Mikrofotografie benutzten Geräte (Mikroskop, Fotoapparat mit Zubehör) müssen sich in einem einwandfreien Zustand befinden, damit die Scharfeinstellung gesichert ist und das Bild während der Aufnahme ruht. Das erfordert hohe Präzision aller mechanischen Teile. ①

Ein Anwendungsgebiet ist die **Metallmikroskopie** (vgl. Wahlkurs 1, S. 93).

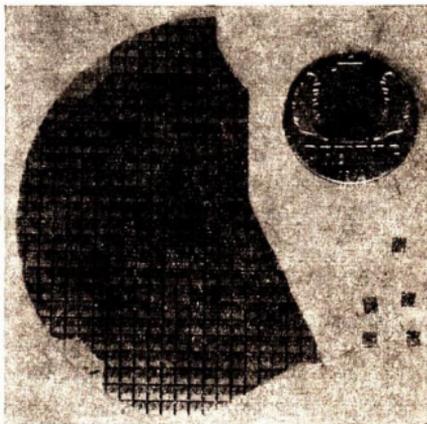
Der Einsatz optischer Geräte und Verfahren

Der folgende Abschnitt zeigt an zwei ausgewählten Beispielen, welche Möglichkeiten die Anwendung optischer Geräte und Verfahren bietet. Das Ziel, kontinuierlich eine

hohe Steigerung der Arbeitsproduktivität zu sichern; kann heutzutage nur durch die Anwendung der modernsten Technik erfolgen. Auch das Erzielen wissenschaftlich-technischer Höchstleistungen erfordert die Anwendung neuer Verfahren. Die hier aufgeführten Beispiele sollten auch unter diesem Gesichtspunkt betrachtet werden.

Optische Geräte werden auch zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen eingesetzt. Während noch vor 20 Jahren elektronische Bauelemente verwendet wurden, die durch ihre großen Abmessungen gekennzeichnet waren, stellt man heute auf der Grundlage der Silizium-Planartechnologie integrierte Schaltkreise her. Diese enthalten auf einer kleinen Fläche Tausende von miteinander verbundenen elektronischen Bauteilen. Wie ist es möglich, eine solche Anzahl von Bauelementen auf kleinsten Flächen unterzubringen? Hierfür wendet man ein Verfahren an, welches sich Mikrolithographie nennt und wie folgt realisiert wird. Eine Silizium-Einkristallscheibe mit einem Durchmesser von 75 mm bis 100 mm wird mit einer hauchdünnen Schicht eines lichtempfindlichen Materials — des Fotoresists — belegt. Mit Hilfe einer Foto-schablone, die den zu produzierenden Schaltkreis enthält, wird die Scheibe mit UV-Licht im Wellenlängenbereich um 400 nm (Seite 200) bestrahlt. In einem anschließend als Entwickler wirkenden Lösungsmittel verändert die Resistenzschicht ihre Löslichkeit. Dadurch erhält man auf der Scheibe das Muster des Schaltkreises. In dem nachfolgenden Ätzprozeß wird das Schaltkreismuster in die darunter liegende Halbleiterscheibe übertragen. Für die Herstellung der Schablonen und der Übertragung des Schablonenbildes werden spezielle optische Geräte benötigt. Von dem Einzelschaltkreis stellt man zunächst mit einem Bildgenerator ein zehnfach vergrößertes Bild her. Hierfür werden die Elementarfiguren mosaikartig zehnfach vergrößert auf einer Fotoplatte zusammengesetzt. Anschließend wird dieses Einzelbild wieder im Maßstab 10:1 verkleinert und auf ein mit Fotolack beschichtetes Glas-Chrom-Substrat projiziert. Durch rasterförmige Anordnung einer Vielzahl gleicher Einzelschaltkreise in natürlicher Größe wird die Originalschablone zusammengestellt. Das erfolgt mit einem automatisch gesteuerten Kreuztisch, der mäander- oder kammartig schrittweise bewegt wird. Dabei wird eine Lagegenauigkeit von weniger als einem Zehntel Mikrometer erreicht. Für die Übertragung der Schablonen auf die Silizium-scheibe verwendet man Justier- und Belichtungseinrichtungen mit Hochleistungsobjektiven. Dabei wird das Bild weiter verkleinert und man erreicht somit kleinste Elementarabmessungen.

Bild 197/1 zeigt eine Silizium-Einkristall-scheibe mit den produzierten Schaltkrei-

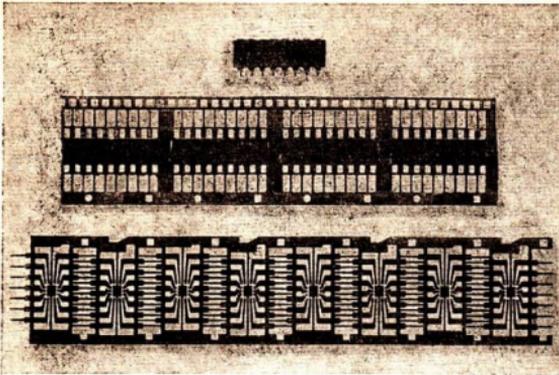


97/1

Einkristallscheibe mit produzierten
Schaltkreisen

- ① Fertigen Sie mikrofotografische Aufnahmen an, in dem Sie eine Spiegelreflexkamera mit einem Stativ über einem Schulmikroskop anordnen! (Hinweis: Durchführung im halbverdunkelten Raum mit künstlicher Lichtquelle im Durchlichtverfahren)

198/1
Eingelötete und fertige
Schaltkreisbausteine



sen. Daneben liegen fünf Schaltkreisbausteine, die anschließend einzeln mit Lötflächen verbunden und vor mechanischer Beschädigung geschützt werden (Bild 198/1).

Ein weiteres Anwendungsbeispiel optischer Geräte und Verfahren findet man

in der Mikrofilmtechnik bei der Herstellung und Verwendung von Mikrofiches. Das sind Planfilme, auf denen im verkleinerten Maßstab mehrere Zeichnungen oder Seiten eines Buches enthalten sind. So ist es z. B. möglich, auf einen Mikrofiche im Format A6 60 Seiten eines Zeitschriftenheftes im Format A5 zu speichern. Dieses Verfahren weist einige Vorteile vor allem für die wissenschaftliche Arbeit auf. Jährlich erscheinen etwa 50000 wissenschaftliche Bücher. Diese Zahl nimmt von Jahr zu Jahr zu. Bücher müssen gelagert werden. Die Lagerräume nehmen dadurch kaum vertretbare Größen an. Durch das Mikrofiche-Verfahren ist es möglich, Lagerraum bis zu 98% einzusparen. Das bedeutet gleichzeitig Kostenersparnisse für Lagerräume. Außerdem besteht die Möglichkeit, Kopien an mehreren Stellen aufzubewahren, die relativ umständliche Fernleihe würde dadurch entfallen. Des weiteren ist es einfacher, die verfilmten Dokumente gegen Vernichtungsgefahr zu schützen. Besonders günstig erweist sich das für die Aufbewahrung großer technischer Zeichnungen. Der geringe Platzbedarf macht es möglich, die Zeichnungen direkt am Arbeitsplatz zu stationieren. Ein weiterer Vorteil ist das schnelle Auffinden bestimmter Literaturangaben. Speziell aufgebaute Sucheinrichtungen mit entsprechenden Registrier- bzw. Suchworten erleichtern die Suche nach ausgewählten Themen. Für die Herstellung von Mikrofiche benötigt man spezielle Mikrofiche-Aufnahmegeräte. Diese komplizierten Aufnahmeapparate ermöglichen eine automatische Einstellung in die jeweilige Aufnahmeposition der vielen Einzelbelichtungen.

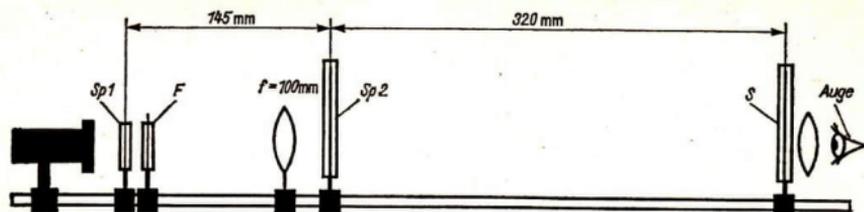
Für das Lesen der Mikrofiches benötigt man spezielle Lesegeräte. Der Mikrofiche wird hierzu in das Gerät eingelegt.

Nach dem Einschalten des Geräts können die einzelnen Seiten eines Zeitschriftenheftes nacheinander auf einem Bildschirm vergrößert abgebildet werden.

5. Farben des Lichts

Die Wellennatur des Lichts

7
▼ Mit dem in Bild 199/1 dargestellten Versuch soll ein möglichst schmales Strahlenbündel mit Hilfe einer verstellbaren Spaltblende erzeugt werden. Zur besseren Beobachtung wird das Spaltbild auf einem durchscheinenden Schirm in Richtung Lichtquelle mit einer Lupe betrachtet. ①



199/1 · Zur Beugung am Spalt

Beim Verkleinern des Spaltes stellt man zunächst fest, daß auch das scharfbegrenzte Spaltbild kleiner wird. Bei einer bestimmten Einstellung des Spaltes wird das Spaltbild aber wieder breiter. Man beobachtet helle und dunkle Streifen, die in den Schattenraum eindringen. Das bedeutet, daß von einer geradlinigen Ausbreitung des Lichtes nicht mehr gesprochen werden kann. Wie läßt sich diese Erscheinung erklären? Hierzu ist es notwendig, die Natur des Lichtes zu untersuchen. Über die Natur des Lichtes wurden zwei grundsätzliche Theorien aufgestellt, und zwar stammt

- a) von Newton die Theorie, Licht besteht aus Teilchen und
- b) von Huygens die Theorie, Licht ist eine Wellenerscheinung.

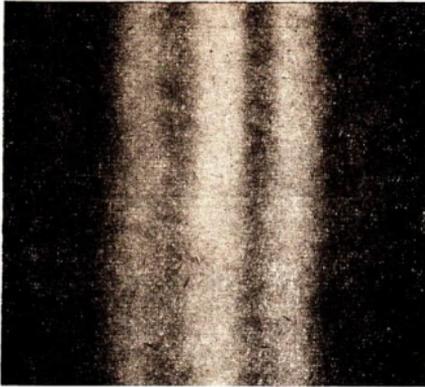
In der Tat gibt es physikalische Erscheinungen, wie z. B. den Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt), die sich nur erklären lassen, wenn angenommen wird, daß das Licht aus Teilchen, den sogenannten Photonen, besteht. Dagegen lassen sich andere Erscheinungen, wie Beugung und Interferenz, nur mit Hilfe der Wellentheorie erklären. Der folgende Abschnitt wird sich mit der von Huygens aufgestellten Theorie, Licht als Wellenerscheinung, auseinandersetzen. Die hierin betrachteten Vorgänge werden unter dem Begriff Wellenoptik zusammengefaßt.

Geht man bei der Auswertung des im Bild 199/1 dargestellten Versuches davon aus, daß Licht Wellencharakter besitzt, dann müssen ähnliche Erscheinungen auftreten, wie sie bei Wasserwellen bekannt sind. Typische Merkmale für das Vorhandensein einer Welle sind die Erscheinungen der **Beugung** und der **Interferenz**. ②

Mit Hilfe der Wellentheorie kann die auf dem Projektionsschirm beobachtete Figur erklärt werden. Der Spalt Sp1 wirkt annähernd als punktförmige Lichtquelle. Die hiervon ausgehenden Lichtwellen treffen auf den verstellbaren Spalt Sp2. Ist dieser Spalt sehr klein, dann wirkt er wieder wie der Ausgangspunkt einer oder mehrerer Elementarwellen. Damit dringt das Licht in den sogenannten Schattenbereich ein. Man sagt: Die Welle wird hinter das Hindernis gebeugt. Den Vorgang nennt man **Beugung**. Damit ist geklärt, wie das Licht hinter das Hindernis gelangt. Wie kommt es aber zu den hellen und dunklen Streifen? Unter der Voraussetzung, daß der Spalt Sp2 sehr klein ist, wirken nur die beiden Kanten des Spaltes als Wellenzentren, die stets gleichzeitig vom Licht der Spaltöffnung Sp1 angeregt werden. Die beiden Wellenzentren senden ihr Licht immer im gleichen Rhythmus aus. Diese Lichtwellen überlagern einander. Man sagt, sie sind **interferenzfähig** bzw. sie sind **kohärent**.

Dabei kann es vorkommen, daß ein Wellenberg auf einen Wellenberg oder ein Wellental auf ein Wellental trifft. In diesem Falle spricht man von **Verstärkung**. Auf dem Schirm erhält man an diesen Stellen helle Streifen. Trifft ein Wellenberg auf ein Wellental, so erhält man **Auslöschung**. Man beobachtet an diesen Stellen dunkle Streifen

- ① Führen Sie den Versuch durch und beschreiben Sie Ihre Beobachtung!
- ② Informieren Sie sich über die Eigenschaften mechanischer Wellen im LB Ph 10!



auf dem Schirm. Unter bestimmten Umständen kann Licht plus Licht also Dunkelheit ergeben (Bild 200/1).

Die charakteristischen Erscheinungen, die dabei auftreten, werden unter dem Begriff Interferenz zusammengefaßt. Versucht man diese Interferenzfiguren mit zwei Lichtquellen, z. B. zwei Glühlampen, zu erzeugen, so mißlingt dieser Versuch. Das liegt daran, daß bestimmte Bedingungen nicht eingehalten werden konnten. So ergeben sich Interferenzfiguren beim Überlagern zweier Wellenzüge nur, wenn die beiden Lichtquellen punktförmig sind und die Wellenzüge in ihrer Wellenlänge, Schwingungsebene und Schwingungsphase übereinstimmen. Die von beliebigen Lichtquellen ausgehenden endlichen Wellenzüge erfüllen die oben genannten Bedingungen nicht. ①

Die Wellenlänge des Lichtes

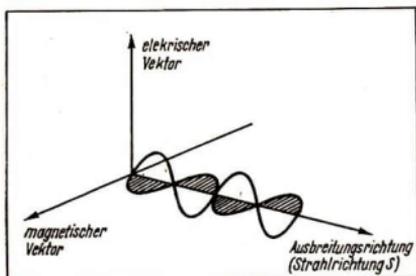
Eine Welle wird durch charakteristische Größen^r (Kenngrößen), der Wellenlänge und der Amplitude, beschrieben. Da das Licht Eigenschaften von Wellen besitzt, muß es möglich sein, die Wellenlänge zu bestimmen. Thomas Young (1773 bis 1829) zeigte als erster durch Überlagerung zweier Wellen die Interferenzerscheinungen beim Licht. Er benutzte einen ähnlichen Versuchsaufbau wie in Bild 199/1 dargestellt. Anstelle der verstellbaren Spaltblende setzte er einen Doppelspalt ein. Es gelang ihm, die Wellenlänge des Lichts zu ermitteln.

In Experimenten hat man Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm ermittelt. Man nennt diesen Teil den sichtbaren Bereich des Lichts, da dieses Licht Empfindungen auf der Netzhaut hervorzurufen vermag. Anhand der Werte erkennt man, daß die Länge einer Lichtwelle sehr klein ist. Unter Licht versteht man heute aber nicht nur den sichtbaren Bereich, sondern darüber hinaus auch Bereiche, die nicht mehr vom menschlichen Auge wahrgenommen werden, wie z. B. das Infrarot, das Ultraviolett oder das Röntgenlicht.

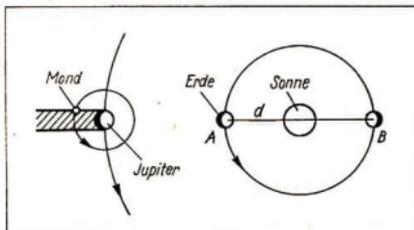
Die Amplitude

Eine weitere Kenngröße der Welle ist die **Amplitude**. In der Mechanik versteht man hierunter den größten Abstand eines schwingungsfähigen Teilchens von der Ruhelage.

Dieser Abstand wird auch **Schwingungsweite** genannt und mit y_{\max} bezeichnet. Da es sich beim Licht um elektromagnetische Wellen handelt, muß man sich von den Vorstellungen des mechanischen Wellenbildes lösen. Hier handelt es sich nicht um schwingungsfähige Teilchen, sondern um schnell veränderliche elektrische und magnetische Felder, die sowohl ihre Stärke als auch ihre Richtung ändern. Man kann die Vorgänge einer elektromagnetischen Welle mit Hilfe der entsprechenden Feldgrößen darstellen. Wie in Bild 201/1 zu erkennen, stehen die schwingenden Größen, die elektrische und magnetische Feldstärke, senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung (Strahlrichtung S). Das bedeutet, daß es sich bei Lichtwellen um Transversalwellen handelt. Man nennt die Ebene, in der sich die elektrische Feldgröße ändert, die Schwingungsebene. Die Ebene, in der sich die magnetische Feldgröße ändert, heißt Polarisationsebene.



201/1
Darstellung einer elektromagnetischen Welle



201/2
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Olaf Römer

Die Lichtgeschwindigkeit

Wellen breiten sich mit einer endlichen Geschwindigkeit aus. Das gilt auch für elektromagnetische Wellen, also auch für Lichtwellen. Früher glaubte man, daß das Licht für die Ausbreitung keine Zeit benötigt. Das liegt wohl daran, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts sehr groß ist. Als erster bestimmte der dänische Astronom Olaf Römer (1644 bis 1710) die Lichtgeschwindigkeit (Bild 201/2). Er untersuchte das Eintreten der Jupitermonde in den Schattenbereich des Jupiters. Für verschiedene Stellen der Erdbahn berechnete er das Eindringen eines Jupitermondes in den Schattenbereich. Dabei stellte er fest, daß die Verfinsterung des Jupitermondes in der Stellung B um etwa 16 Minuten später als in Stellung A beginnt. Er erklärte sich diese Tatsache folgendermaßen: In Stellung B muß das Licht zusätzlich einen Weg zurücklegen, der dem Durchmesser d der Erdbahn entspricht. Aus dem bekannten Durchmesser von $d = 3 \cdot 10^8$ km und der Verzögerungszeit von 16 min errechnete er die Lichtgeschwindigkeit c :

$$c = \frac{d}{t}; \quad c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{16 \text{ min}}; \quad c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{960 \text{ s}}; \quad c = 312500 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

- ① Weisen Sie an weiteren Versuchen die Wellennatur des Lichtes nach (PSV 10, V 2.2.1.; V 2.2.2.!

Es gibt noch eine Reihe anderer Verfahren zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, auf die hier nicht eingegangen wird. Heutzutage wird die Lichtgeschwindigkeit durch elektronisches Messen der Laufzeit erzeugter Lichtblitze gemessen. Genaue Messungen haben für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum den Wert $c = 299\,793\text{ km/s}$ ergeben. Durchläuft das Licht einen lichtdurchlässigen Stoff, dann beträgt in diesem Stoff die Lichtgeschwindigkeit:

$c_{\text{Stoff}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n}$. Hierbei ist n die Brechzahl des Stoffes. Man erkennt, daß die Lichtgeschwindigkeit in einem lichtdurchlässigen Stoff stets um den Faktor $1/n$ kleiner als im Vakuum ist. Die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit in den einzelnen Stoffen ist auch die Ursache für die Brechung des Lichtes beim Übergang von einem Stoff in einen anderen. ①

Die Frequenz des Lichts

Unter der Frequenz einer mechanischen Welle versteht man die Anzahl der Schwingungen der gekoppelten schwingungsfähigen Teilchen je Sekunde. Bei elektromagnetischen Wellen ändern sich ständig Richtung und Stärke der elektrischen und magnetischen Felder. Die Anzahl der Schwingungen je Sekunde in einem beliebigen Punkt des Feldes gibt die Frequenz an. Diese läßt sich wie folgt berechnen. Zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit, der Wellenlänge und der Frequenz einer Welle existiert die mathematische Beziehung:

$$c = \lambda \cdot f. \quad (11)$$

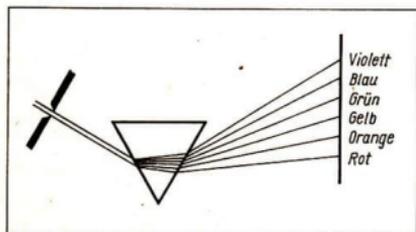
Man bezeichnet sie als Grundgleichung der Wellenlehre. In Versuchen wurde gezeigt, daß die Wellenlänge von Lichtwellen sehr klein und die Ausbreitungsgeschwindigkeit sehr groß ist. Stellt man die Gleichung nach f um, dann kann man durch Einsetzen der ermittelten Größen für die Lichtgeschwindigkeit und die Wellenlänge die Frequenz des Lichts ermitteln. Diese beträgt z. B. für die Wellenlänge von $\lambda = 800\text{ nm}$:

$$f = \frac{c}{\lambda}; \quad f \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{800 \text{ nm s}}; \quad f \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m s}}; \quad f \approx 3,75 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$$

Daraus wird ersichtlich, daß die Frequenz des Lichtes sehr groß ist. ②

Die Zerlegung des weißen Lichtes

Von einer Glühlampe mit vorgesetzter Spaltblende trifft ein schmales weißes Lichtbündel so auf ein Prisma, daß es ungefähr symmetrisch durchsetzt wird und anschließend auf einen Schirm fällt.

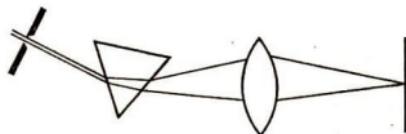


202/1 Zerlegung des weißen Lichtes am Prisma

Im Versuch kann man neben der bekannten Erscheinung der Brechung eine Aneinanderreihung verschiedener Farben beobachten. Diese Farben besitzen keine scharfe Grenze, sondern gehen allmählich ineinander über (Bild 202/1, vergl. auch LB Ph 10 Farbtafel S. 113).

Man bezeichnet dieses Farbband als **Spektrum**, den Vorgang im Prisma als Dispersion. Es ist üblich, zwischen sechs Farben zu unterscheiden, und zwar: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett. Die einzelnen Farben heißen **Spektralfarben**. Der Versuch zeigt: **Weißes Licht ist aus einzelnen Bestandteilen zusammengesetzt, die im Spektrum voneinander getrennt sind.** Die Spektralfarbe Rot wird im Versuch am wenigsten und die Spektralfarbe Violett am meisten gebrochen. Ermittelt man die Wellenlängen der einzelnen Spektralfarben, dann stellt man fest, daß Rot die größte und Violett die kleinste Wellenlänge aufweist. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die einzelnen Bestandteile im Vakuum gleich ist, muß nach der Grundgleichung der Wellenlehre die Frequenz der einzelnen Spektralfarben unterschiedlich sein. ③

Die durch Dispersion auftretenden Farben kann man in Versuchen zu weißem Licht wiedervereinigen. Das kann z. B. mit einer Sammellinse gezeigt werden. Die Sammellinse wird so in den zerlegten Strahlengang gebracht, daß sich der Vereinigungspunkt auf dem Projektionsschirm befindet (Bild 203/1). Man erhält dann auf dem Schirm einen weißen Fleck. ④



203/1 Wiedervereinigung der Spektralfarben

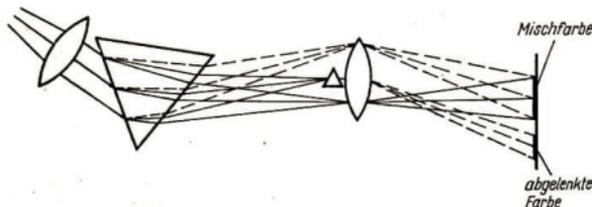
Durch die Umkehrung ist erwiesen, daß sich weißes Licht aus den einzelnen Spektralfarben zusammensetzt. Beim weißen Licht können die einzelnen Spektralfarben durch ihr gleichzeitiges Einwirken auf das Auge nicht getrennt wahrgenommen werden. Den Effekt der Wiedervereinigung der Spektralfarben erreicht man auch durch entsprechendes Aufstellen zweier Prismen (vergl. LB Ph 10, Farbtafel). Ursache der Zerlegung des Lichts am Prisma ist die unterschiedlich starke Brechung der einzelnen farbigen Bestandteile. Diese erfolgt an der ersten brechenden Fläche. Die unterschiedliche Brechung wird durch die verschiedenen Geschwindigkeiten der Lichtanteile innerhalb des optischen Stoffes hervorgerufen. Für jede Spektralfarbe ergibt sich damit auch eine unterschiedliche Brechzahl n des brechenden Stoffes.

Geht Licht vom Vakuum oder von einem optischen Stoff in einen optischen Stoff mit anderer Brechzahl über, so ändern sich die Wellenlängen und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der einzelnen farbigen Bestandteile. Die Frequenz der jeweiligen Spektralfarbe ändert sich dabei nicht, d. h. die Farbe bleibt die gleiche.

Die letztgenannte Aussage hat zur Folge, daß eine ausgeblendete Spektralfarbe an einem Prisma zwar umgelenkt aber nicht weiter zerlegt werden kann.

- ① Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Lichtes in Flintglas ($n_{\text{Flintglas}} = 1,8$; $c_{\text{Vakuum}} \approx 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$!)
- ② Berechnen Sie die Frequenz des gelben Lichtes mit einer mittleren Wellenlänge von 580 nm ($c_{\text{Vakuum}} \approx 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$!)
- ③ Vergleichen Sie die Angaben in Tabelle 121/1 im LB Ph 10!
- ④ Berechnen Sie die Wellenlänge des Lichts, wenn die Frequenz mit $7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ angegeben wird und ermitteln Sie die Spektralfarbe ($c_{\text{Vakuum}} \approx 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$!)

Blendet man einzelne Gebiete aus dem Spektrum aus und vereinigt den Rest, so entsteht kein weißes, sondern farbiges Licht (Bild 204/1). Man nennt diesen farbigen Bestandteil die **Mischfarbe**.



204/1
Zur Entstehung der
Mischfarbe

Mischfarben

ausgeblendete Spektralfarbe	Mischfarbe des Restes
Rot	blaugrün
Grün	purpur
Eisblau	orange
Gelb	ultramarinblau
Orange	eisblau
Violett	grüngelb

Je zwei in der Tabelle gegenüberstehende Farben ergänzen sich beim Vereinigen wieder zu Weiß. Deshalb nennt man sie auch Ergänzungsfarben oder Komplementärfarben. ①

Die Spektren

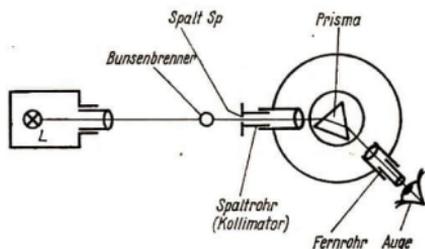
Verwendet man als Lichtquelle glühende feste oder glühende flüssige Körper, so erhält man Spektren, die alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes enthalten. In diesem Fall spricht man von **kontinuierlichen Spektren** (vgl. Bild Glühlicht, LB Ph 10, Farbtafel). Dagegen erzeugt das Licht, das von glühenden Gasen ausgesandt wird, entweder **Linienpektren** (vgl. Bild Wasserstoff, LB Ph 10, Farbtafel), wenn das Gas atomar auftritt oder **Bandenspektren** (vgl. Übersicht, LB Ph 10, S. 124), wenn es molekular auftritt. Bedeutsam dabei ist, daß jedes Element unter ganz bestimmten Bedingungen ein ganz bestimmtes, für das Element charakteristisches Linien- oder Bandenspektrum aussendet. Damit ist es möglich, das Licht glühender Gase zu analysieren und dadurch Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Elementen zu treffen. Man nennt diese Methode die **Spektralanalyse**. Sie wird z. B. zur Erforschung des stofflichen Aufbaus des Weltalls genutzt. Das von den Gestirnen ausgehende Licht wird in einem **Spektralapparat** zerlegt und mit Hilfe von Vergleichsskalen analysiert. Die Spektralanalyse wird aber auch für industrielle Zwecke genutzt. So kann man z. B. aus der Stärke der einzelnen Linien quantitative Aussagen über die Zusammensetzung von Legierungen treffen. Hierzu wird das Material verdampft und das Gas zum Leuchten gebracht. Mit dieser Methode ist es möglich, selbst winzige Mengen eines Elements nachzuweisen. ②③

Die bisher behandelten Spektren nennt man auch **Emissionsspektren**, da ihre Entstehung durch das Ausenden von Licht zustande kommt. Hierbei unterscheidet man zwischen dem kontinuierlichen Spektrum und den diskontinuierlichen Spektren. Zu den diskontinuierlichen Spektren gehören die Linien- und Bandenspektren. Untersucht man mit einem Spektralapparat das Sonnenlicht, so stellt man fest, daß das Spektrum von einer Anzahl dunkler Linien durchzogen ist. Diese Linien nennt man

nach ihrem Entdecker Joseph Fraunhofer (1787 bis 1826) **Fraunhofersche Linien** (vgl. LB Ph 10, Farbtafel). Vergleicht man mit dem Spektralapparat das Sonnenspektrum mit dem Spektrum eines glühenden Gases, so fällt auf, daß sich die hellen Linien des Linienspektrums an derselben Stelle befinden wie einige dunkle Linien der Fraunhoferschen Linien. Man spricht von der Umkehrung der Spektrallinien. (4) (5) Wie kommen diese dunklen Linien zustande? Der folgende Versuch gibt Antwort auf diese Frage.

Vor das Spaltrohr Sp eines eingerichteten Spektralapparates stellt man in einiger Entfernung eine starke Lichtquelle (Bogenlampe) auf. Direkt vor dem Spaltrohr wird ein Bunsenbrenner aufgebaut (Bild 205/1). Mit der an der Bogenlampe vorhandenen Linse bildet man das Bild der glühenden Kohlestäbe genau in der Mitte des Bunsenbrenners ab (Schirm dafür benutzen). Danach zündet man den Bunsenbrenner an und hält in die Flamme einen in Kochsalz (NaCl) getauchten Draht. Man beobachtet eine intensiv leuchtende gelbe Natriumflamme. Betrachtet man mit dem Spektralapparat nur die gelbe Natriumflamme, indem zwischen der Flamme und der Bogenlampe ein lichtundurchsichtiger Schirm gehalten wird, so beobachtet man die in hellem Gelb auf dunklem Grund aufleuchtenden Doppellinien des Natriums. Nimmt man den undurchlässigen Schirm weg, so erscheinen jetzt an derselben Stelle zwei dunkle Linien im kontinuierlichen Spektrum. Es fällt auf, daß jener Anteil im kontinuierlichen Spektrum des Lichtes der Bogenlampe fehlt, den das durchstrahlte Gas (Natriumdampf) als Eigenlicht aussendet.

205/1
Beobachtung der Fraunhoferschen Linien
mit dem Spektralapparat

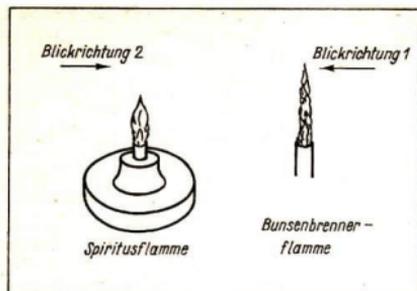


Allgemein kann formuliert werden: **Geht Licht durch ein leuchtendes Gas hindurch, dann wird Licht derjenigen Wellenlängen absorbiert, das es selbst aussendet.**

Diese Erscheinung wurde erstmals 1859 von Gustav Robert Kirchhoff (1824 bis 1887) entdeckt. Da diese Linien durch Absorption von Licht auftreten, bezeichnet man diese als **Absorptionsspektren**. Bei näherer Betrachtung dürfte es noch verständlich sein, daß bestimmte Wellenlängen des Lichtes der Bogenlampe absorbiert werden. Da das Gas aber auch Licht aussendet, fällt es schwer, die dunklen Streifen zu erklären. Der folgende Versuch soll dieses Problem untersuchen.

Zwei Lichtquellen mit unterschiedlicher Strahlungsintensität werden so aufgestellt, daß der Betrachter das Licht der einen Lichtquelle durch das Licht der anderen Lichtquelle beobachtet. Die unterschiedliche Strahlungsintensität erhält man durch Lichtquellen verschiedener Temperatur, z. B. durch eine Bunsenbrennerflamme und eine Spiritusflamme (Bild 206/1). In beide Flammen hält man Kochsalz, so daß sie gelb aufleuchten. Die Bunsenbrennerflamme leuchtet dabei heller

- ① Überprüfen Sie anhand von Versuchen die Richtigkeit der Angaben der Tabelle (PSV 7, V 4.2.3.)!
- ② Informieren Sie sich über Bau und Wirkungsweise eines Spektralapparates (PSV 7, V 3.4.20.)!
- ③ Untersuchen Sie die Spektren verschiedener glühender Stoffe (PSV 7, V 4.1.11.)!
- ④ Weisen Sie die Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum nach (PSV 7, V 4.1.14.)!
- ⑤ Demonstrieren Sie die Umkehrung der Natriumlinien (PSV 7, V 4.1.15.)!



als die Spiritusflamme. Blickt man zuerst in Richtung 1, so leuchtet die Bunsenbrennerflamme hell auf dem dunkleren Grund der Spiritusflamme. Dagegen erscheint in Blickrichtung 2 die Spiritusflamme dunkel auf dem helleren Grund der Bunsenbrennerflamme.

Aus dem Versuch wird deutlich, daß der Eindruck des Dunklen, wie auch des Hellen, durch den Kontrast mit der Umgebung hervorgerufen wird. Die Beobachtung der Fraunhoferschen Linien ist mit dem Versuch in Blickrichtung 2 zu deuten.

Die Entstehung des Linienspektrums beim Betrachten des Sonnenlichtes kann wie folgt erklärt werden: Das Innere der Sonne besteht aus einem Kern sehr hoher Temperatur. Dieser Kern sendet ein kontinuierliches Spektrum sehr hoher Intensität aus. Da jedoch die Sonne von einer Schicht glühender Gase mit nicht so großer Strahlungsintensität umgeben ist, werden diejenigen Wellenlängen des Lichtes vom kontinuierlichen Spektrum absorbiert, die die glühenden Gase selbst enthalten. Dadurch kommt es zur Entstehung der Fraunhoferschen Linien. Da die Emissionsspektren mit den einzelnen Gruppen der Fraunhoferschen Linien übereinstimmen, kann man durch Vergleiche beider Spektren Stoffe auf der Sonne nachweisen, die auch auf der Erde vorkommen. ①

Die Farbempfindung

Die Netzhaut unseres Auges ist aus Stäbchen und Zäpfchen aufgebaut. Während die Stäbchen nur Helligkeitsempfindlich sind, nehmen die Zäpfchen die Farben des Lichtes wahr. Über das Farbsehen wurden verschiedene Theorien aufgestellt (Dreifarben- und Vierfarbentheorie). Man nimmt an, daß jedes Zäpfchen nur für einen bestimmten Bereich des Lichtes sehr empfindlich ist. Nach Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894) ist das menschliche Auge trichromatisch. Das bedeutet, daß drei verschiedene Arten von Zäpfchen den Farbeindruck vermitteln. Der maximale Empfindlichkeitsbereich erstreckt sich auf Rot, Grün und Ultramarinblau. Der Farbeindruck entsteht durch Anregen der drei Gruppen von Zäpfchen, welche entsprechend den Wellenlängen des Lichtes in verschiedener Stärke erfolgt. Bisher wurden die einzelnen Spektralfarben betrachtet und festgestellt, daß Licht einer bestimmten Wellenlänge von einer Lichtquelle ausgesendet wird und in das Auge gelangt. Wie kommt aber der farbige Eindruck von Körpern zustande, die selbst nicht leuchten? Führen Sie zur Erklärung folgenden Versuch durch und halten Sie Ihre Beobachtung fest!

Mit Hilfe des Versuchsaufbaus in Bild 202/1 wird ein Spektrum auf einem Projektionsschirm erzeugt. Nacheinander werden verschiedenfarbige Gegenstände in das Spektrum vor dem Projektionsschirm gehalten, und zwar a) ein weißer, b) ein gelber, c) ein blauer und d) ein schwarzer Gegenstand.

Unter der Voraussetzung, daß die Körper reine Farben besitzen und deren Fläche das gesamte Spektrum erfaßt, kann man im Versuch 12 folgendes beobachten:

- a) das vollständige Spektrum;
- b) der gelbe Teil des Spektrums wird stark reflektiert, Rot und Grün werden schwach und Blau überhaupt nicht reflektiert;
- c) Blau wird vollkommen reflektiert, Grün nur schwach; alle anderen Farben werden absorbiert;
- d) alle Farben werden absorbiert.

Das bedeutet, daß ein Körper die Eigenschaft besitzt, das auf ihn fallende Licht entweder zu reflektieren oder zu absorbieren. Die Farbe eines Körpers kommt also dadurch zustande, daß ein bestimmter Bereich der Spektralfarben stark reflektiert und der restliche Teil absorbiert oder auch durchgelassen wird. Nur der vom Körper reflektierte Teil ruft im Auge des Betrachters die jeweilige Farbempfindung hervor. Man bezeichnet diese Farben als **Körperfarben** oder **Pigmente**. Spektralfarben und Körperfarben sind physikalisch nicht gleich. Reflektiert ein Körper sämtliche im kontinuierlichen Spektrum enthaltene Farben, so erscheint er weiß. Ein Körper, der alle Farben des Spektrums absorbiert, erscheint schwarz. In Versuchen zeigt sich, daß es keine Körper gibt, die das auffallende Licht 100prozentig reflektieren, absorbieren oder durchlassen. ② ③

Die Farbmischung

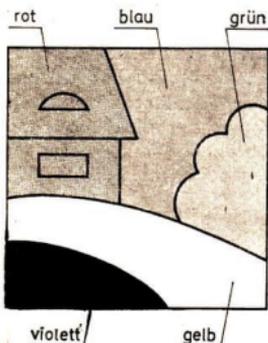
Der im Bild 204/1 dargestellte Versuch hat auch gezeigt, daß die Wiedervereinigung der ausgeblendeten Spektralfarbe mit dem Rest der Mischfarbe wieder Weiß ergibt. Läßt man dagegen verschiedenfarbiges Licht, z. B. Blau und Gelb auf dieselbe Stelle eines Projektionschirmes treffen, dann erhält man Grün. Man spricht von Farbmischung. Da sich im beschriebenen Beispiel die Farben addieren, spricht man von **additiver Farbmischung**. Eine andere Methode der Farbmischung ist die **subtraktive Farbmischung**. Das weiße oder farbige Licht einer Lichtquelle durchstrahlt nacheinander verschiedene Farbfilter. Das sind farbige Substanzen, z. B. Glas, die nur bestimmte Wellenlängen des Lichtes hindurchlassen und andere absorbieren (vgl. Seite 211). Dadurch werden einzelne Bereiche des Lichts im Filter absorbiert, das heißt, von der ursprünglichen Strahlung werden diese subtrahiert. In Versuchen kann man zeigen, daß mit jeder der beiden Mischungsmethoden alle Farbtöne aus drei **Grundfarben** erzeugt werden können. Für die **additive Farbmischung** verwendet man die **Grundfarben Rot, Grün und Ultramarinblau**. (vgl. auch LB Ph 10 V, Farbtafel).

Als Grundfarben für die subtraktive Farbmischung werden Gelb, Purpur und Blaugrün verwendet. ④

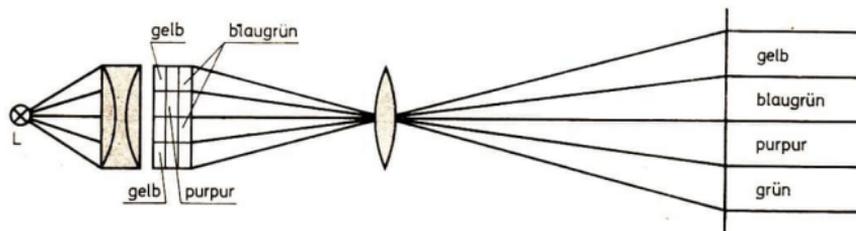
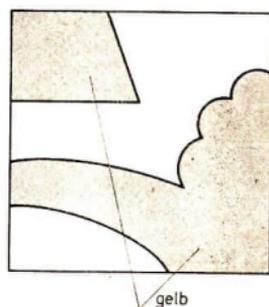
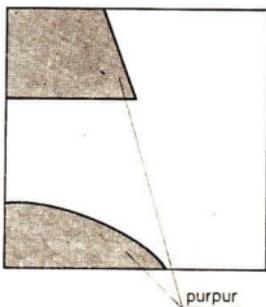
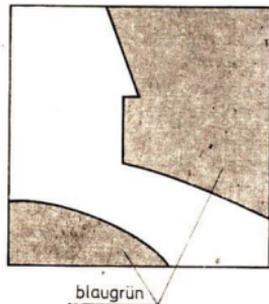
-
- ① Das gelbe Licht des Natriumdampfes entspricht in Luft einer Wellenlänge von 589 nm. Wie groß ist die Wellenlänge dieses Lichtes in Wasser?
 - ② Welcher Unterschied besteht zwischen Spektralfarben und Körperfarben?
 - ③ Warum sehen Gegenstände bei künstlichem Licht anders aus als bei Tageslicht?
 - ④ Betrachten Sie mehrere farbige Gegenstände durch farbige Glasscheiben! Erklären Sie Ihre Beobachtung!

Anwendung der Farbmischung

Es ist bekannt, daß der Maler durch Vermischen verschiedener Farben andere Farbtöne erzeugen kann. So läßt sich z. B. durch Vermischen einer blauen mit einer gelben Farbe Grün herstellen. Bei diesem Beispiel handelt es sich um die subtraktive Farbmischung. Auch für die **Farbfotografie** kommt die Farbmischung in Anwendung. Heutzutage wendet man Verfahren an, welche nach dem Prinzip der subtraktiven Farbmischung arbeiten. Das soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Von dem Objekt (Bild 208/1) werden drei Farbaufnahmen in den Farben Gelb, Purpur und Blaugrün hergestellt (Bild 208/2). Nach dem Entwickeln legt man die drei Bilder aufeinander und projiziert sie auf eine Projektionswand erhält man das Farbbild durch subtraktive Farbmischung.



208/1 Aufnahmeobjekt



208/3 Projektion für subtraktive Farbmischung

Bei den heute verwendeten ORWOCOLOR-Filmen handelt es sich um einen Dreischichtenfarbfilm, der nach fertiger Entwicklung drei übereinanderliegende reine Farbstoffe (Gelb, Purpur, Blaugrün) enthält. Durch subtraktive Farbmischung erhält man das vielfarbige Bild.

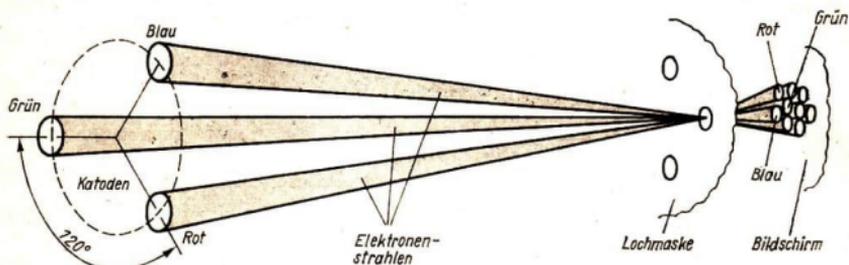
Auf die Vorgänge der chemischen Reaktion der einzelnen Schichten beim Entwickeln und Belichten des Films kann hier nicht eingegangen werden.

Große Bedeutung hat die Farbfotografie u. a. auch bei der Erforschung des Weltalls und der Erde. 1976 umkreisten die sowjetischen Kosmonauten Oberst Waleri Bykowski und Wladimir Axjonow mit Sojus 22 die Erde 127 mal. Aus einer Flughöhe von 265 km wurden mit der Multispektralkamera MKF 6 vom VEB Carl Zeiss Jena Aufnahmen von der Erde angefertigt. Die Multispektralkamera fotografierte mit sechs Objektiven gleichzeitig in verschiedenen schmalen Spektralbereichen dieselben Gebiete der Erdoberfläche. Vier dieser Aufnahmen lagen im sichtbaren Bereich des Lichtes, zwei im nahen Infrarotbereich. Die Multispektralkamera erfaßte auf dem Negativfilm von 55 mm × 80 mm eine relativ große Fläche von 18 975 km². Acht bis zehn solcher Bildsätze reichen aus, um die gesamte Fläche der DDR zu fotografieren. Insgesamt wurden 2400 Bildsätze mit je 6 Aufnahmen angefertigt, die eine Fläche von 50 Millionen km² erfaßten. Die Auswertungen der Aufnahmen dienen sowohl wissenschaftlichen wie auch volkswirtschaftlichen Zwecken. So können z. B. in Mischwäldern besser die Anteile der einzelnen Baumarten abgeschätzt oder eine Unterscheidung zwischen gesunden und kranken Baumbeständen vorgenommen werden. Welche Bedeutung das für die Forstwirtschaft großer Waldbestände, z. B. in Sibirien, hat, ist unübersehbar. Für die Agrarwissenschaftler ergeben sich anhand der Auswertungen Möglichkeiten zur Bestimmung von Feldgrößen, Ernteerträgen sowie auch von Ernteterminen. Auch das Wasserangebot dieser Regionen kann genau ermittelt werden. Eine immer größere Bedeutung kommt auch dem Umweltschutz zu. Mit Hilfe der Aufnahmen ist es möglich, Gewässer nach ihrem Gehalt an Schwebestoffen zu untersuchen. Verschmutzungsquellen lassen sich eindeutig klassifizieren. Das gilt sowohl für die Verschmutzung der Flüsse, des Meeres wie auch der Luft. Auch das Vorhandensein von Bodenschätzen läßt sich ermitteln. Da man diese auf den Aufnahmen nicht direkt erkennt, wendet man indirekte Verfahren zu ihrer Ermittlung an. So kann man durch Vorhandensein geologischer Strukturen oder auch durch ein besonderes Abschmelzen des Schnees auf das Vorhandensein bestimmter Bodenschätze schließen. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt durch Projektion eines vierkanaligen Multispektralprojektors, der ebenfalls vom VEB Carl Zeiss Jena hergestellt wurde. Mit dem Multispektralprojektor vom Typ MSP-4 lassen sich gleichzeitig vier Aufnahmen vom selben Objekt zur Deckung bringen, wobei jede Aufnahme durch Einsatz eines Farbfilters in einer beliebigen Farbe wiedergegeben werden kann.

Farbaufnahmen dienen aber auch zur Erforschung des Alls. So konnten erstmals 1982 Farbfotos von der sowjetischen automatischen Station Venus 13 von der Venus zur Erde gefunkt werden. Die hierbei ausgestrahlten Informationen mußten einen Weg von über 70 Millionen Kilometer zurücklegen. Die Aufnahmen der Venusoberfläche erfolgten nacheinander durch Einsatz eines roten, blauen und grünen Filters.

Das **Farbfernsehen** arbeitet nach dem Prinzip der additiven Farbmischung. Genau wie beim Schwarzweiß-Fernsehen erfolgt eine punktweise Zerlegung, Übertragung und Rekonstruktion der Bilder. Dazu werden die einzelnen Bildpunkte mittels dreier Aufnahmeöhren in die Grundfarben Rot, Grün und Blau zerlegt, in Signale umgewandelt und ausgestrahlt. Nach dem Empfang trennt man die einzelnen Farbsignale im Fernsehgerät und führt sie drei Katodenstrahlensystemen der Bildröhre zu. Die von den Katoden ausgehenden Elektronenstrahlen treffen auf eine Dreiergruppe von rot, grün und blau aufleuchtenden Teilchen des Bildschirms. Der Bildschirm ist mit einer

Vielzahl solcher Dreiergruppen ausgerüstet. Diese sind so klein, daß vom Auge nur der additiv gemischte Farbeindruck wahrgenommen wird. Die Farbintensität hängt jeweils von der Stärke des auftretenden Strahls ab. Bild 210/1 zeigt die schematische Darstellung der Vorgänge in der Bildröhre.



210/1 Lochmasken-Farbbildröhre

Damit die drei Elektronenstrahlen richtig auf die zugehörigen Leuchtpunkte auftreffen, müssen sie zuvor durch eine Lochmaske hindurchgehen. Im Loch konvergieren die Elektronenstrahlen. Die Lochmaske besitzt ebenfalls eine Vielzahl von Löchern. Sie ist vor dem Bildschirm angeordnet. Neuerdings verwendet man anstelle von Lochmasken sogenannte Schlitzmasken. Wie der Name schon sagt, enthält die Maske der Bildröhre schlitzartige Öffnungen in vertikaler Richtung. Die Strahlerzeugungssysteme, die Kathoden, liegen in einer Ebene nebeneinander.

Auch der Bildschirm ist aus nebeneinanderliegenden, senkrechten Farbstreifen zusammengesetzt. Man nennt diese Bildröhre Inline-Farbbildröhre. Ihr Vorteil gegenüber der Bildröhre mit Lochmasken besteht vor allem in einem konturenscharfen Bild mit brillanten Farben. Die Deckung der drei Grundfarben ist vom Herstellerwerk für immer eingestellt. Sie besitzt außerdem eine hohe Lebensdauer. Ihr technischer Aufwand ist jedoch größer als bei der Lochmasken-Farbbildröhre.

Der Farbdruck

Betrachtet man das Bild eines Schwarz-Weiß-Druckes mit der Lupe, so stellt man fest, daß es sich aus kleinen, aneinandergereihten Punkten zusammensetzt. Man bezeichnet diese geordnete Form als Raster, das Bild als Rasterbild. Durch Veränderung der Größe der einzelnen Punkte erreicht man einen Übergang vom Schwarz über alle Graustufen bis zum Weiß. Das Auge nimmt auf Grund der geringen Abmessungen der einzelnen Punkte nur die jeweiligen Graustufen bzw. Schwarz oder Weiß wahr. Auch beim Farbdruck findet dieses Verfahren Anwendung. Anstelle der schwarzen Raster verwendet man farbige, die den drei Grundfarben der subtraktiven Farbmischung entsprechen. Man spricht vom Dreifarbendruck, wenn durch Übereinanderdrucken der drei durchscheinenden (lasierenden) Grundfarben Gelb, Purpur und Blaugrün alle Zwischentöne erzielt werden. Die neu entstandenen Druckfarben sind Komponenten der subtraktiven Farbmischung. Die Betrachtung eines Farbdruckes erfolgt nach den Gesetzen der additiven Farbmischung.

Sehr häufig kommt der Vierfarbendruck in Anwendung. Hier wird neben den oben genannten Grundfarben zusätzlich ein Schwarzdruck eingesetzt. Das wird erforderlich, da sich bei dem Dreifarbendruck durch das Nebeneinanderwirken von additiver und

subtraktiver Farbmischung Farbfehler ergeben. Diese können zwar durch Farbkorrekturen beseitigt werden, sind aber sehr zeitraubend. Die Farbtafel des LB Ph 10 V zeigt einen vergrößerten Bildausschnitt eines Vierfarbendruckes.

Die Farbfilter

In der Fotografie werden auch Farbgläser, sogenannte Farbfilter, eingesetzt. Betrachtet man diese Gläser mit dem Auge, so erscheinen sie mehr oder weniger gefärbt. Diese Wirkung wird durch die Absorption gewisser Bereiche des sichtbaren Spektrums hervorgerufen. Die Absorption des Lichtes hängt von den bei der Glasschmelze zugesetzten färbenden Substanzen ab.

Für die Färbung von Farbgläsern verwendet man im allgemeinen Oxide von Schwermetallen, wie Kupfer, Kobalt, Nickel, Eisen usw. Durch die Schmelze wird die gesamte Masse des Glases homogen gefärbt. Neben den hier beschriebenen Verfahren kann man Farbgläser auch durch Aufbringen einer dünnen Farbglasschicht oder durch Beizen von geeigneten Weißgläsern herstellen. Der Einsatz von Farbfiltern in der Fotografie hängt von der spektralen Empfindlichkeit des Aufnahmematerials und vom aufzunehmenden Objekt ab. So ist z. B. das Bromsilber auf der Schicht eines Schwarz-

211/1

a) Schwarzweißaufnahme
ohne Filter



b) Schwarzweißaufnahme
mit Filter



weißfilms vor allem für blaues und violettes Licht empfindlich. Durch Anfärben des Bromsilbers wurde schon eine verbesserte Farbempfindlichkeit des Schwarzweißfilms erreicht. Natürlich werden die Farbunterschiede im Objekt auf einem Schwarzweißfilm nur durch unterschiedliche Graustufen wiedergegeben. Es gibt aber Aufnahmeobjekte, die einen sehr starken Anteil an blauem und violettem Licht besitzen, z. B. die Wolken am Himmel. Dadurch wird der Film sehr stark belichtet und man erhält zu helle Bilder ohne Kontraste. Durch Einsatz von Filtern läßt sich eine Korrektur erreichen. Man wählt für dieses Beispiel ein Filter, das einen Teil des blauen Lichtes absorbiert, aber die anderen Bereiche des Spektrums hindurchläßt. Hierfür eignet sich ein Gelbfilter. Bild 211/1a zeigt eine Aufnahme eines Objektes ohne Filter. Im Bild 211/1b wurde zum besseren Hervorheben der Wolken ein Gelbfilter eingesetzt. ①

① Halten Sie beim Fotografieren verschiedene farbige Plastfolien vor das Objektiv und werten Sie die entwickelten Aufnahmen aus!

Lösungen

Prinzipien der Temperaturmessung

- S. 9 1 291,15 K 273,15 K 373,15 K
116,85 °C -93,15 °C -273,15 °C
- S. 15 2 $\Delta l = 462 \text{ mm}$
 $E = 6,6 \text{ mm} \cdot \text{K}^{-1}$
- S. 29 1 $l = 1,50 \text{ m}$
- S. 39 3 $\Delta T = 385 \text{ K}$
- S. 61 1 $R_z = 54,1 \Omega$
 $A_z = 0,03 \text{ mm}^2$
2 $R_z = 7,5 \Omega$
 $A_z = 1,7 \text{ mm}^2$
 $d_z = 1,5 \text{ mm}$

Elektrische Energie und ihre Nutzung durch Motoren

- S. 121 1 $n = 125 \text{ min}^{-1}$
- S. 147 2 $R = 0,47 \Omega$
3 $R = 14,4 \Omega$
- S. 151 2 $U_2 = 230,3 \text{ V}$
- S. 153 1 $I_1 = 10 \text{ A}$
 $I_2 = 21,7 \text{ A}$
- S. 155 2 $\eta = 0,99$
 $I_N = 0,572 \cdot 10^3 \text{ A}$

Grundgesetze der Optik

- S. 167 3 $n_{Gl} = 1,50$
4 $n_w = 1,33$
5 $\beta_1 = 22,8^\circ$ Abweichung $7,83^\circ$
 $\beta_2 = 74,6^\circ$ Abweichung $34,6^\circ$
- S. 169 1 $\alpha_G = 41,81^\circ$
- S. 173 2 $s' = 400 \text{ mm}$
5 $f = 100 \text{ mm}$
6 $D = -12,5 \text{ dpt}$
7 $f_1 = +100 \text{ mm}$
 $f_2 = +1330 \text{ mm}$
 $f_3 = -125 \text{ mm}$
- S. 177 2 $s = 105 \text{ cm}$
- S. 179 1 $V = 6$
- S. 187 2 $s = 66 \text{ cm}$
- S. 189 5 $s = 82,2 \text{ mm}$
 $y_1' = 875,9 \text{ mm}$
 $y_2' = 1313,8 \text{ mm}$
- S. 193 3 $V = 60$
- S. 195 1 $V = 250$
- S. 203 1 $c_n = 166551,6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
2 $f = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
4 $\lambda = 400 \text{ nm}$ (violett)
- S. 207 1 $\lambda_w = 442 \text{ nm}$

- Aberration 173
Abbildungsmaßstab 171
Abgleichwiderstand 59
absoluter Nullpunkt 9
Alkoholthermometer 16
Amplitude 200
Anlaufstrom 133
Astigmatismus 173
Ätzen 91
Auflichtbeleuchtung 194
Ausdehnungskoeffizient,
— ,kubisch 12
— , linear 11
Ausgleichsleitung 55
Ausschlag-schaltung 42, 58
— -verfahren 44
Außenpolmaschine 115
- Baumannprobe 92
Belastungsfälle 101
Belastungsgrenzen 73
Belichtungszeit 181
Beugung 199
Biege-festigkeit 104
— -gleichung 77
— -linie 77
— -moment 78, 79
— -spannung 77
Biegung 77
Bilderzeugung mit Linsen
164
Bildfeldwölbung 173
Bimetall-thermometer 30
— -streifen 31
Bindungskräfte 104
bleibende Dehnung 73
Blende 180
Blindleistung 128
Breckkraft 172
Breckzahl, absolute 166
- Brechungsgesetz 165
Breguett 6
Brennpunkt 170
Brinell-Härteprüfung 112
Bruch-dehnung 96, 98
— -festigkeit 97, 111
— -grenze 96
Brückenschaltung 44, 60
- Celsius 6
- Dauerfestigkeit 101
Dehnung, bleibende 69,
88, 98
— , elastische 77
Dehnzahl 71
Diaprojektor 188
Dioptrie 172
Drehmoment 128
Drehstromgenerator 120
Druck-festigkeit 100
— -spannung 77
Durchbiegung 78
Durchlichtbeleuchtung
194
Dunkelfeldmikroskopie
194
- Eichung 16
elastische Dehnung 77
— Verformung 88
Elastizität 68
Elastizitäts-gesetz 71
— -grenze 73
— -modul 71
elektrische Leistung 128
elektromotorisches Prinzip
127
Elementarzelle 85
- Empfindlichkeit einer
Meßanordnung 15
Entwurfsberechnung 99
Ergänzungsfarben 204
- Fahrenheit 5
Fahrraddynamo 119
Fahrzeuffeder 81
Faraday 6
Farb-druck 210
— -fehler 176
— -fernsehen 209
— -filter 211
— -fotografie 208
— -mischung 207
Fernrohr 189
Festigkeit 96
— , eines Idealkristalls 104
— , der Realkristalle 105
— , statische 100
Festigkeitsprüfung 111
Festkörper, idealer
— , Kristallaufbau 84
— , realer 68
Fieberthermometer 22
Fixpunkt 16
Fließ-grenze 74, 89
— -linie 89, 98
Flüssigkeitsthermometer
8, 13, 23
Formbarkeit 94
Fotoapparat 176
Fotografie 184
Fraunhofersche Linien 205
Fremdatom 107
Fremdstoffatom 88
Frequenz des Lichts 202
- Gefüge 88
Generator 115

Gesamtstrahlungs-pyrometer 64
Gitter-fehler 107, 108
— -konstante 85
Gleichstrom-generator 121, 123
— -motor 133
—, pulsierender 122
Gleit-linie 89, 98
— -vorgang 89
Grenzwinkel 167

Halbleiter 6
Halbleiter-Widerstands-thermometer 47
Härte 104
Härteprüfung 111
—, Brinell 112
Hellfeldmikroskopie 194
Hochstromtransformator 156
Hookesches Gesetz 71, 73

Idealkristall 104
Induktionsgesetz 115
Innenpolmaschine 116
Interferenz 199

Kapillare 13
Kelvin 8
Kleintransformator 159
Klingeltransformator 159
Kollektor 122
Koma 174
Kompensations-schaltung 60
— -verfahren 44
Kondensator 186
Kontaktthermometer 19
Körner 88
Korn-fläche 91
— -grenze 91, 108
Körperfarben 207
Kristall-baufehler 90, 106
— -bausteine 104
— -gitter 84
Kristallisation 87
Kristallite 87

Laborthermometer 18
Längenänderung fester Körper 9

Läufer 115
Leerstelle 107
Lenzsches Gesetz 115
Leichtbauweise 109
Leistungs-faktor 128
— -transformator 154
— -schutzschalter 33
Licht 198
— -bündel 165
— -empfindlichkeit 184
— -geschwindigkeit 201
— -leiter 168
Linearmotor 141
Linse 164
—, Sammel- 170
—, Zerstreungs- 170
Linsen-fehler 173
— -gleichung 172

Magnetfluß 148
Mantelthermoelement 57
Maschinethermometer 18
Maximum-Minimum-Thermometer 22
mechanische Belastung 68
— Spannung 68
Meßfühler 23
Meßgrößenwandlung 13
Metallbindung 87
metallographische Untersuchung 90
Metallstab-Ausdehnungs-thermometer 27
Metallthermometer 27
Metall-Widerstandsthermometer 40
MHD-Generator 125
Mischkristall 88
Mikrofiche 198
Mikrofotografie 196
mikroskopische Untersuchung 93
Mikroskop 194
Motor 127
Motorschutzschalter 34
Multispektralkamera 209

Nenn-spannung 128
— -stromstärke 128
Normalvergrößerung 194
Nullabgleichsverfahren 44
Nullpunkt, absoluter 9

Oberflächentemperatur-messung 63
Objektiv 178

Permanentmotor 135
plastisch 74
Plastizität 68
Pressen 94
Primärspule 148
Probestab 111
Proportionalitätsgrenze 73
Prüf-maschine 111
— -stab 97
Punktfehler 107
Pyrometer 63

Quecksilberthermometer 13

Raumgitter 86
Realkristall 105
Reaumur 6
Rotor 115

Schärfentiefe 180
Scheinleistung 128
Schleifkontakt 116
Schliffbild 90
Schmieden 94
Schwellfestigkeit 101
Sehwinkel 190
Sekundärspule 148
Sicherheitsfaktor 99
Sichtfeld 178
spanlose Formgebung 94
Spannung, mechanische 68
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 73
Spannungsreihe, thermo-elektrische 53
Spannungsübersetzung 150
Spartransformator 158
Spektren 204
Stelltransformator 160
Stromstärkeübersetzung 151
Stromversorgungsgerät 159
Supraleitung 163

- Temperatur** 8
 — -abhängigkeit 36
 — -meßtechnik 6
 — -messung 46, 61, 63
 — -regelung 51
 — -wandler 37
 — -wächter 51
Thermistor 48
 thermoelektrischer Effekt 6, 52
 — Spannungsreihe 53
Thermoelement 6
 — -Thermometer 56
Thermograf 32
Thermometerflüssigkeit 14
Träger 83
Totalreflexion 167
Transformator 148
 —, idealer 150
 —, realer 152
Tripelpunkt des Wassers 8

Umkehrfilm 183
Umspanner 154
Universalmotor 140

Verbundbetrieb 162
Verformbarkeit 98
Verformung, elastische 88
 —, plastische 89
Vergrößerung 191
Vergrößerungsgerät 186
Verlängerung 80
Versetzung 90
Versetzungslinie 107
Verzeichnung 174
Volumenänderung 11

Walzen 95
Wärme 9
Wechselfestigkeit 101
Wechselstrom-generator 117
 — -motor 139
Wellenlänge des Lichts 200
Wellennatur des Lichts 198
Werkstoff-legierung 105
 — -prüfung 96, 111

 — -substitution 110
 — -verbesserung 110
Widerstandsmoment 79
Widerstandsthermometer 6
Winkelgeschwindigkeit 129
Wirkleistung 128
Wirkungsgrad 128, 153

Zerlegung des Lichts 202
Ziehen 94
Zugfestigkeit 100, 104
Zugkraft 68
zulässige, Biegespannung 77
 —, mechanische Spannung 75
 —, Zugspannung 75, 77, 99
Zündspule 160
Zusammenhangskraft 68
Zweileiterschaltung 43
Zwischengitteratom 107

Quellennachweis der Abbildungen

Charité, Berlin: 186/1 · Foto-Thümmler, Dresden: 24/2 · Kolwig, Halle: 179/1, 179/2, 181/1, 182/1, 184/1, 197/1, 198/1, 211/1 · Meyer, Berlin: 92/1 · VEB Elektro-Apparate-Werke, Berlin: 35/2 · VEB Thermometerwerk, Geraberg: 24/2 · VWV, Archiv, Berlin: 84/1, 84/2, 86/2, 91/1, 145/1, 148/1, 155/1, 156/1, 169/1, 176/1, 200/1 · VEB Verlag Technik, Berlin: 118/2 · Wilhelm, Rathenow: 194/1 · Winter, Potsdam: 26/1, 26/2, 34/2, 51/1

Reproduktionen aus:

Welt der Metalle, VEB Fachbuchverlag, Leipzig: 93/1 · Schumann Metallographie, VEB Grundstoffverlag, Leipzig: 93/1, 196/1

Kurzwort: 021706 Anwendung d. Physik
DDR 7.60 M