

**Wissensspeicher
für die
Berufsbildung**

W

**GRUNDLAGEN
DER
ELEKTROTECHNIK**

BÄHR · ECKE



WISSENSPEICHER FÜR DIE BERUFSBILDUNG

GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK

Oberlehrer Dipl.-Ing.-Päd. Hans-Jörg Bähr
Oberlehrer Dipl.-Gwl. Wolfgang Ecke

6., durchgesehene Auflage



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Als berufsbildende Literatur für die Ausbildung der Lehrlinge zum Facharbeiter und für
Werktätige, die zum Facharbeiter ausgebildet werden, für verbindlich erklärt

1. 9. 1980

Ministerium für Elektrotechnik/Elektronik

Dieser Wissensspeicher wurde mit Unterstützung der Zentralstelle für Aus- und Weiter-
bildung am Institut für Rationalisierung des Industriebereichs Elektrotechnik/Elektronik
entwickelt.

239 Bilder, 38 Tafeln

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1976

Bearbeitete Auflage: © VEB Verlag Technik, Berlin, 1980

Unveränderter Nachdruck 1981

Lizenz 201 · 370/169/81

DK 621.3(075) · LSV 3502 · VT 5/5246-6

Lektor: Dipl.-Ing. Siegfried Liebscher

Printed in the German Democratic Republic

Schreibsatz: VEB Verlag Technik, Berlin

Reproduktion, Offsetrotation und buchbind. Verarbeitung:

(52) Nationales Druckhaus, VOB National, Berlin

Redaktionsschluß: 10. 11. 1980

Bestellnummer: 552 867 7

DDR: 6, 25 M

Vorwort

Der Wissensspeicher wurde für die Berufsausbildung von Elektrofacharbeitern aller Industriebereiche entwickelt. Er kann außerdem in der Ausbildung aller der Berufe eingesetzt werden, deren Ausbildungsunterlagen das Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ enthalten. Er enthält eine fachlich geordnete und methodisch aufbereitete, komprimierte Fassung der Grundlagen der Elektrotechnik. Die Erfordernisse der Leistungselektrotechnik und die der Informationselektrotechnik werden in gleichem Maße berücksichtigt. Einige komplizierte Zusammenhänge werden ausführlicher, als in Wissensspeichern üblich, dargestellt und erläutert. Tafeln zu allen Stoffkomplexen sollen dem Erkennen von objektiven Gesetzen, vorhandenen Prinzipien und einzuprägenden Regeln dienen. Um Gemeinsamkeiten der drei Feldarten deutlich herauszuarbeiten, haben die Autoren, wo erforderlich, gleichartige Formulierungen gewählt.

Der Wissensspeicher soll die Ausführungen des Lehrenden im Unterricht und bei Laborversuche unterstützen und dem Lernenden zur Zweitinformation dienen.

Die 5., stark bearbeitete Auflage kann neben der vorliegenden 6., durchgesehenen Auflage im Unterricht eingesetzt werden.

Zur Information über das Angebot der gesamten berufsbildenden Literatur empfehlen wir den Literaturkatalog Berufsbildung, der vom Staatssekretariat für Berufsbildung herausgegeben wurde.

Die Autoren und der Verlag danken allen, die am Entstehen des Wissensspeichers als Gutachter und Berater mitgewirkt haben. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Rose für die zahlreichen fachlichen und methodischen Hinweise. Den Lehrlingen und den Werkträgern in der Aus- und Weiterbildung wünschen wir, daß ihnen der Wissensspeicher zum erfolgreichen Abschluß der Berufsausbildung verhelfen möge.

Für Hinweise, die sich aus der Anwendung des Wissensspeichers im Unterricht und in der Praxis ergeben, sind wir dankbar.

Autoren und Verlag

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung in die Elektrotechnik	7
1.1.	Bedeutung der Elektrotechnik für die Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik	7
1.2.	Bereiche der Elektrotechnik	8
1.3.	Elektrische Energie als Erscheinungsform der Materie	9
2.	Wesen der Elektrizität	11
2.1.	Elektrische Ladungen	11
2.2.	Elektrische Leiter, Halbleiter, Nichtleiter	12
3.	Elektrische Erscheinungen in Leitern	14
3.1.	Elektrisches Strömungsfeld	14
3.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes	14
3.3.	Meßgrößen des elektrischen Strömungsfeldes	15
3.3.1.	Strom, Stromstärke und Stromdichte	15
3.3.1.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen	15
3.3.1.2.	Wirkungen des elektrischen Stromes	19
3.3.2.	Urspannung, Spannungsabfall, Feldstärke, Potential, Pegel	21
3.3.2.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen	21
3.3.2.2.	Urspannungserzeugung	26
3.3.3.	Elektrische Leitfähigkeit – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Stromdichte	26
3.4.	Zusammenhänge zwischen Spannung und Strom im elektrischen Strömungsfeld	27
3.4.1.	Elektrischer Widerstand	27
3.4.1.1.	Elektrischer Leitwert und elektrischer Widerstand	27
3.4.1.2.	Bemessungsgleichung des elektrischen Widerstandes	28
3.4.1.3.	Temperaturabhängigkeit von Widerständen	29
3.4.2.	Spannungs-Strom-Verhalten von Widerständen	30
3.4.2.1.	Lineare Spannungs-Strom-Charakteristik	30
3.4.2.2.	Nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik	31
3.5.	Elektrische Stromkreise	33
3.5.1.	Grundstromkreis und seine Elemente	33
3.5.2.	Betriebszustände elektrischer Stromkreise	35
3.6.	Erweiterte Stromkreise und ihre Berechnungsgesetze	38
3.6.1.	Arten erweiterter Stromkreise, Begriffsbestimmungen	38
3.6.2.	Kirchhoffsche Gesetze	40
3.7.	Zusammenschaltung von Zweipolen	42
3.7.1.	Schaltungen elektrischer Widerstände	42
3.7.1.1.	Reihenschaltung von Widerständen	42
3.7.1.2.	Parallelschaltung von Widerständen	44
3.7.1.3.	Gemischte Schaltung von Widerständen	47
3.7.2.	Zusammenschaltung elektrischer Spannungsquellen	48
3.7.2.1.	Reihenschaltung von Spannungsquellen	48
3.7.2.2.	Parallelschaltung von Spannungsquellen	49
3.8.	Elektrische Energie und Leistung	50
3.8.1.	Elektrische Energie	50
3.8.1.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten	50
3.8.1.2.	Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen und umgekehrte Energiewandlungen	52

3.8.2.	Elektrische Leistung	62
3.8.3.	Wirkungsgrad, Leistungsumsatz und Anpassung	63
4.	Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern	66
4.1.	Elektrostatisches Feld	66
4.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektrostatischen Feldes	66
4.2.1.	Feldbilder	66
4.2.2.	Erscheinungen des elektrostatischen Feldes	68
4.3.	Meßgrößen des elektrostatischen Feldes	69
4.3.1.	Verschiebungsfluß, Ladung und Verschiebungsflußdichte	69
4.3.2.	Spannung und elektrische Feldstärke	70
4.3.3.	Dielektrizitätskonstante – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Verschiebungsflußdichte	73
4.3.4.	Dielektrischer Verschiebungsstrom	74
4.4.	Kondensator	75
4.4.1.	Kapazität von Kondensatoren	75
4.4.2.	Bemessungsgleichung der Kapazität	76
4.5.	Zusammenschaltung von Kondensatoren	76
4.5.1.	Reihenschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität	77
4.5.2.	Parallelschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität	78
4.6.	Kondensatoranordnungen mit geschichtetem Dielektrikum	80
4.7.	Erwünschte und unerwünschte Kondensatoranordnungen	81
4.8.	Verlustlose und verlustbehaftete Kondensatoren	82
4.9.	Verhalten von Kondensatoren bei verschiedenen Betriebsarten	83
4.9.1.	Verhalten von Kondensatoren an unveränderlicher Gleichspannung	83
4.9.2.	Verhalten von Kondensatoren an veränderlicher Gleichspannung	83
4.9.3.	Verhalten von Kondensatoren bei Schaltvorgängen	84
4.9.3.1.	Begriffsbestimmungen bei Schaltvorgängen	84
4.9.3.2.	Lade- und Entladevorgänge an Kondensatoren	85
4.10.	Zeitkonstante von Kondensatoren	90
5.	Elektromagnetische Erscheinungen	91
5.1.	Elektromagnetisches Feld	91
5.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes	91
5.2.1.	Feldbilder	91
5.2.2.	Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes	92
5.3.	Elektromagnetische Felder elektrischer Ströme	93
5.3.1.	Magnetfelder stromdurchflossener geradliniger Leiter	94
5.3.2.	Magnetfelder stromdurchflossener Spulen	95
5.4.	Meßgrößen des elektromagnetischen Feldes	96
5.4.1.	Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte	96
5.4.2.	Magnetische Durchflutung und magnetische Feldstärke	97
5.4.3.	Definition des magnetischen Leitwertes	98
5.4.4.	Bemessung des magnetischen Leitwertes	99
5.4.5.	Magnetischer Widerstand	100
5.4.6.	Magnetische Feldkonstante – Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Magnetflußdichte	100
5.5.	Magnetische Kreise	101
5.5.1.	Maschengesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen	101
5.5.2.	Verzweigungsgesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen	102
5.5.3.	Durchflutungsgesetz	103

5.6.	Elektromagnetische Kreise mit verschiedenen Magnetmaterialien	104
5.6.1.	Elektromagnetische Kreise mit Luft bzw. Vakuum als Magnetmedium	104
5.6.2.	Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika	105
5.6.3.	Hystereseschleife – Entstehung und energetische Deutung	107
5.7.	Permanentmagnetismus als Sonderform des Elektromagnetismus	108
5.8.	Elektromagnetische Induktion	109
5.8.1.	Allgemeines Induktionsgesetz	110
5.8.2.	Gegeninduktion	114
5.8.3.	Selbstinduktion	116
5.8.4.	Wirbelstrombildung	117
5.8.5.	Spule und elektromagnetisches Feld	119
5.8.5.1.	Induktivität von Spulen	119
5.8.5.2.	Zusammenschaltung von Spulen	120
5.8.5.3.	Erwünschte und unerwünschte Spulenanordnungen	122
5.8.5.4.	Verlustlose und verlustbehaftete Spulen	123
5.9.	Verhalten von Spulen bei verschiedenen Betriebsarten	124
5.9.1.	Spule an unveränderlicher Gleichspannung	124
5.9.2.	Spule an veränderlicher Gleichspannung	124
5.9.3.	Verhalten von Spulen bei Schaltvorgängen	125
5.10.	Zeitkonstante von Spulen	130
5.11.	Kraftwirkungen elektromagnetischer Felder	132
5.11.1.	Kraftwirkungen auf magnetisierbare Materialien	132
5.11.2.	Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter	134
5.11.3.	Elektromagnetische Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern.	136
6.	Wechselstromerscheinungen	137
6.1.	Sinusförmige Wechselspannung	138
6.1.1.	Bestimmungsgrößen sinusförmiger Wechselspannungen und -ströme	139
6.1.2.	Grafische Darstellung und Darstellungshilfen	142
6.2.	Wechselstromerscheinungen bei passiven und aktiven Zweipolen	145
6.2.1.	Passive Zweipole im Wechselstromkreis	145
6.2.1.1.	Ideale Widerstände, Spulen und Kondensatoren	145
6.2.1.2.	Zusammenschaltungen von idealen Widerständen, Spulen und Kondensatoren	152
6.2.1.2.1.	Reihenschaltungen	152
6.2.1.2.2.	Parallelschaltungen	155
6.2.1.3.	Reale Widerstände, Spulen und Kondensatoren	158
6.2.2.	Leistung und Energie in Wechselstromkreisen	160
6.2.3.	Elektrische Schwingkreise	161
6.2.3.1.	Reihenschwingkreise	161
6.2.3.2.	Parallelschwingkreise	164
6.2.3.3.	Einfluß des Generatorinnenwiderstandes auf die Eigenschaften elektrischer Schwingkreise	166
6.2.3.4.	Kompensation von Blindleistungen	169
6.2.4.	Zusammenschaltung von Wechselspannungsquellen	172
6.3.	Mehrphasige Wechselspannungen und Wechselströme	174
6.3.1.	Erzeugung mehrphasiger Wechselspannungen	174
6.3.2.	Verkettung mehrphasiger Wechselspannungen	177
6.3.3.	Energie und Leistung im Dreiphasensystem	181
6.3.4.	Magnetische Felder bei Dreiphasenwechselstrom	182
7.	Anhang	184
7.1.	Verwendete Formelzeichen, Benennungen, Einheiten	184
7.2.	Wichtige Konstanten in der Elektrotechnik	187
7.3.	Wichtige Formeln	187
	Sachwörterverzeichnis	191

1. Einführung in die Elektrotechnik

1.1. Bedeutung der Elektrotechnik für die Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik

Der Anteil elektrotechnischer und elektronischer Bauelemente, Baugruppen, Geräte und Anlagen in allen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens, insbesondere in der Industrie, im Gewerbe und in den Haushalten, nimmt ständig zu. Die Werktätigen mit elektrotechnischen Berufen leisten durch ihre schöpferische Arbeit in allen Bereichen der Volkswirtschaft einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Wirtschaftskraft unserer Republik. Dadurch wird die Erfüllung der Hauptaufgabe maßgeblich beeinflusst. Bei der Gestaltung der entwickelten sozialistischen Gesellschaft und beim allmählichen Übergang zum Kommunismus wird das Wachstum der Produktivkräfte entscheidend vom Niveau, von der Struktur und dem Entwicklungstempo der Energiewirtschaft beeinflusst. Bei der weiteren Verbesserung und Sicherung der Elektroenergieerzeugung, -übertragung und -anwendung erwachsen den Werktätigen mit elektrotechnischen Berufen verantwortungsvolle Aufgaben.

Durch die zielgerichtete Weiterentwicklung der Mikroelektronik und den immer größeren Einsatz der auf dieser Basis geschaffenen Bauelemente in der gesamten Volkswirtschaft entstehen höhere Anforderungen an alle Werktätigen.

Für alle Bereiche der Elektrotechnik/Elektronik sind das zusammengefaßt folgende Forderungen:

- ständiger wissenschaftlich-technischer Fortschritt, insbesondere bei der beschleunigten Durchsetzung neuer Technologien;
- Intensivierung in allen Bereichen der Volkswirtschaft der DDR im Zusammenwirken mit der kontinuierlichen Erfüllung der Staatsplanaufgaben und deren zielgerichteter Übererfüllung;
- Steigerung der Arbeitsproduktivität durch Rationalisierung;
- rationelle und sparsame Anwendung von Energie und Rohstoffen;
- konsequente Erfüllung von Exportverpflichtungen nach Menge und Qualität im Rahmen der sozialistischen ökonomischen Integration wie auch gegenüber dem nichtsozialistischen Wirtschaftsgebiet;
- volle Auslastung von hochproduktiven Maschinen und Anlagen;
- Deckung des begründeten Bedarfs an Ausrüstungen und Zulieferungen für alle Bereiche der Volkswirtschaft;
- Bereitstellung hochwertiger Konsumgüter und Sicherung der Ersatzteilversorgung für die Bevölkerung.

Der zukünftige Facharbeiter auf dem Gebiet der Elektrotechnik/Elektronik muß bereit und befähigt sein, diesen gesellschaftlichen Erfordernissen Rechnung zu tragen, weil eine überdurchschnittliche Entwicklung der Elektrotechnik/Elektronik Schlüsselfrage für das Wachstum des ökonomischen Potentials der DDR ist.

1.2. Bereiche der Elektrotechnik

Begriffsbestimmung
„Elektrotechnik“

Die Elektrotechnik ist ein Bereich der Technik. Sie basiert auf der Physik als naturwissenschaftlicher Grundlage. Sie umfaßt die Gesamtheit aller elektrischen Erscheinungen, die damit verbundenen objektiven Naturgesetze und wissenschaftlichen Gesetze, Prinzipien, Regeln und deren zielgerichtete Anwendung und Nutzung in der Volkswirtschaft.

Damit dient die Elektrotechnik dem Menschen zur bewußten Veränderung der Natur zum Zwecke der Befriedigung seiner Bedürfnisse. Besondere Bedeutung hat die Erzeugung elektrischer Energie und ihre Umwandlung in andere Energiearten.

Bereiche

Leistungselektrotechnik

Sie dient der Bereitstellung benötigter Energie an notwendigen Orten und zu gewünschten Zeiten (Bild 1.1).

Informations-elektrotechnik

Sie dient dem Austausch von Informationen zu gewünschten Zeiten über beliebige Entfernungen. Informationsträger sind elektrische Signale (Bild 1.1).

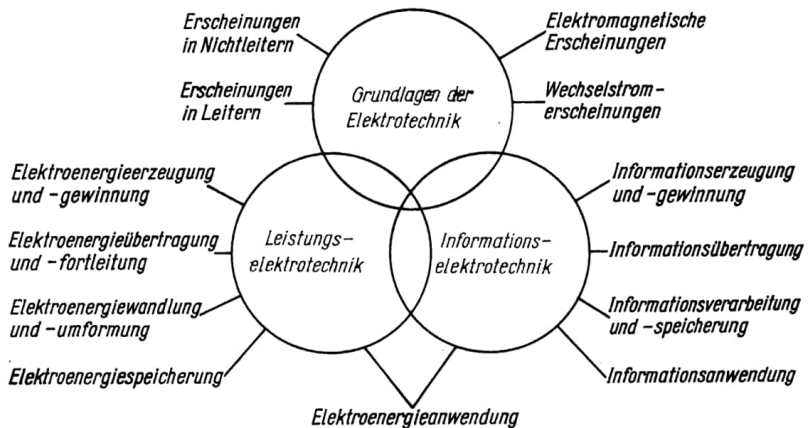


Bild 1.1. Teilbereiche der Elektrotechnik

Eine eindeutige Zuordnung elektrotechnischer Bauelemente, Geräte und Anlagen zu den Bereichen ist nicht immer möglich. Die Bereiche sind sehr eng miteinander verflochten und lassen sich kaum noch trennen.

Beispielsweise werden elektronische Bauelemente, die zur Informationselektrotechnik gehören, seit einigen Jahren verstärkt auch im Bereich der Leistungselektrotechnik verwendet (Bild 1.1).

Grundlagen der
Elektrotechnik

Objektive Gesetze sowie festgelegte Begriffe und vereinbarte Regeln, die Voraussetzung sind für das Erfassen der speziellen elektrotechnischen Bereiche.

1.3. Elektrische Energie als Erscheinungsform der Materie

Begriffsbestimmung
„Materie“

Materie ist die Gesamtheit der außerhalb und unabhängig vom menschlichen Bewußtsein (menschlichen Denken und Wissen) existierenden objektiven Realität.

Materie hat unendlich viele Erscheinungsformen.

Beispiele:

- feste, flüssige oder gasförmige Stoffe;
- Molekül, Atom, subatomares Teilchen;
- Kraftfelder;
- Energie;
- Licht.

Begriffsbestimmung
„Energie“

Energie ist eine Erscheinungsform der Materie. Energie charakterisiert einen bestimmten Zustand.

Energie ist das Vermögen eines physikalischen Systems, Arbeit zu verrichten.

Potentielle Energie

Ist die Fähigkeit eines Körpers, auf Grund seiner Lage oder seines Spannungszustandes Arbeit zu verrichten.

$$W_p = F s \quad (1.1)$$

W_p potentielle Energie,
 F Kraft,
 s Weg.

Kinetische Energie

Muß aufgewendet werden, um einen Körper zu beschleunigen und ihn auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu bringen. Dabei wird Arbeit verrichtet.

$$W_k = \frac{m}{2} v^2 \quad (1.2)$$

W_k kinetische Energie,
 m Masse des Körpers,
 v Geschwindigkeit des Körpers.

Energieerhaltungssatz

In einem geschlossenen System ist die Summe der einzelnen Energien konstant.

$$\Sigma W = \text{konst.}$$

Energieumwandlung

Energie kann weder erzeugt werden, noch kann vorhandene Energie verschwinden. Es treten nur Umwandlungen einer Energieart in andere Arten auf.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie formulierte Robert Mayer 1842.

(Julius Robert v. Mayer, 1814–1878, deutscher Arzt und Naturforscher)

Energiearten

- Elektrische Energie
- Elektromagnetische Energie
- Mechanische Energie
- Wärmeenergie
- Lichtenergie
- Kernenergie

Energieformen in der Elektrotechnik

- Energie ruhender elektrischer Ladungen
- Energie strömender elektrischer Ladungen
- Elektromagnetische Energie

Die Energie ruhender elektrischer Ladungen ist potentielle Energie, die Energie strömender elektrischer Ladungen ist kinetische Energie.

Es ist ein besonderes Merkmal dieser Energieformen, daß sie mit Feldern verknüpft sind.

Begriffsbestimmung „Feld“

Ein Feld ist ein Raum, in dem jedem Punkt des Raumes ein bestimmter Wert einer physikalischen Größe zugeordnet werden kann.

Physikalische Größen nennt man Skalare, wenn sie durch ihren Betrag eindeutig gekennzeichnet sind.

Sind physikalische Größen außerdem richtungsbehaftet, werden sie als Vektoren bezeichnet.

Man unterscheidet deshalb skalare Felder und Vektorfelder.

Beispiele für skalare Felder

- Höhenlinien einer Landkarte
- Isothermen und Isobaren einer Wetterkarte
- Temperaturfeld eines Raumes

Beispiele für Vektorfelder

- Gravitationsfeld der Erde
- Geschwindigkeitsverteilung in einer Strömung
- elektrische Strömungsfelder
- elektrostatische Felder
- elektromagnetische Felder

Feldgrößen

Physikalische Größen, die ein Feld beschreiben.

Beschreibung von Feldern

Es werden unterschieden:

- Wirkungsgrößen - physikalische Größen, die sich in bestimmten Wirkungen, Effekten und Erscheinungen äußern;
- Ursachengrößen - physikalische Größen, die als Ursache für bestimmte Erscheinungen und Vorgänge vorhanden sind oder erzeugt werden;
- Bedingungs- oder Vermittlungsgrößen - beschreiben die notwendigen Bedingungen, unter denen aus Ursachengrößen Wirkungsgrößen entstehen;
- Dichtegrößen sind auf Flächen bezogene Wirkungsgrößen;
- Feldstärkegrößen sind auf Längen bezogene Ursachengrößen.

Hinweis

Im vorliegenden Wissensspeicher werden bei der Abhandlung physikalischer Zusammenhänge die Feldgrößen als Skalare betrachtet, weil sich im Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ alle Berechnungen auf homogene Felder beschränken und nur mit den Zahlenwerten dieser Größen gerechnet wird.

2. Wesen der Elektrizität

2.1. Elektrische Ladungen

Begriffsbestimmung
elektrische Ladungen

Sie kennzeichnen eine Grundeigenschaft bestimmter materieller Erscheinungen, die die elektrischen Vorgänge hervorruft. Elektrische Ladungen sind somit die Ursache aller elektrischen Erscheinungen.

Auf Grund der zwischen Ladungen auftretenden Kraftwirkungen unterscheidet man positive und negative Ladungen.

Elektrostatisches
Kraftwirkungsgesetz

Gleichnamige Ladungen stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an.

Elementarladung e

Der kleinste, nicht mehr teilbare Ladungsbetrag eines Elementarteilchens.

Hinweis

Vgl. Abschn. 3.1.

Elementarteilchen sind u.a.

- Protonen im Atomkern,
- Elektronen in der Atomhülle eines chemischen Elements.

Elektron

Träger der negativen Elementarladung.

Elektron: $Q = -e$

Proton

Träger der positiven Elementarladung.

Proton: $Q = +e$

Elektrizitätsmenge Q
(Ladungsmenge)

Menge von Elementarladungen.

$$Q = n(\pm e) \quad (2.1)$$

n Anzahl der Elementarladungen

$n = 1, 2, 3, \dots, k$

Hinweis

Häufig wird für die physikalische Größe „Ladungsmenge“ nur der Begriff „Ladung“ verwendet.

In einem Atom ist die Anzahl der Protonen und Elektronen gleich groß. Das Atom wirkt nach außen elektrisch neutral (Bild 2.1).

Ionen

Werden Elektronen durch Energieeinwirkung aus dem Atomverband entfernt oder ihm hinzugefügt, ist das Atom nicht mehr elektrisch neutral. Man nennt diese durch Energie veränderten Atome oder Moleküle (Atomgruppen) Ionen.

Positive Ionen
Negative Ionen

Elektronenmangel: positiv geladen
Elektronenüberschuß: negativ geladen

Kennzeichen
elektrischer
Ladungen

- Zwischen elektrischen Ladungen wirken Kräfte.
- Elektrische Ladungen können unter dem Einfluß von Energie bewegt werden.
- Elektrisch geladene Körper streben den neutralen Zustand an (Ausgleichsbestreben).
- Träger beweglicher elektrischer Ladungen sind Elektronen und Ionen.

2.2. Elektrische Leiter, Halbleiter, Nichtleiter

Die elektrischen Eigenschaften der Elemente lassen sich aus ihrer Stellung im Periodensystem der Elemente, der Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale, erklären.

Sind die äußersten Schalen nicht voll mit Elektronen besetzt, kann eine freie Beweglichkeit der Elektronen angenommen werden. Die Anzahl der frei beweglichen elektrischen Ladungsträger ist bei verschiedenen Stoffen unterschiedlich (vgl. Bild 2.1).

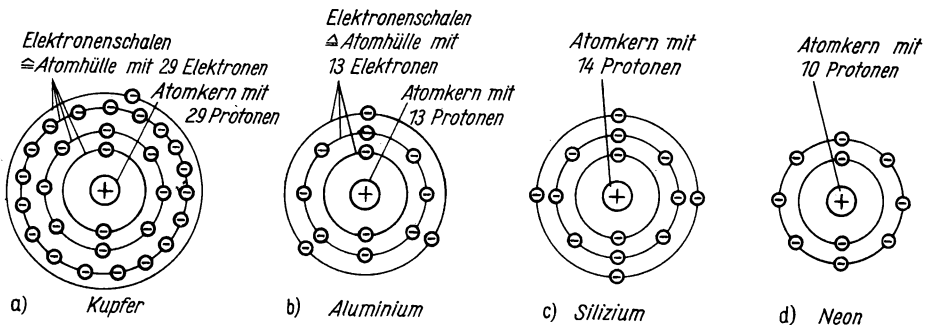


Bild 2.1. Vereinfachte schematische Darstellung verschiedener chemischer Elemente
a), b), c) äußere Elektronenschale nicht voll besetzt
d) äußere Elektronenschale voll besetzt (stabile Edelgaskonfiguration)

Elektrische Leiter
Halbleiter
Nichtleiter



Anzahl frei beweglicher Ladungs-
träger

groß
gering
fast keine

Elektrische Leiter
Elektronenleiter
(Leiter 1. Klasse)

Ladungsträger sind frei bewegliche Elektronen. Die Atome stellen Leitungselektronen zur Verfügung (vgl. Tafel 2.1). Diese Elektronen „wimmeln“ in Zickzackbewegungen zwischen den im Kristallgitter angeordneten positiven Ionen wie die Moleküle eines Gases – sie bilden ein sog. Elektronengas.

Zu den Elektronenleitern gehören

- alle Metalle,
- Metallegierungen.

Durch die Ladungsbewegung tritt kein Stofftransport ein.

Supraleiter

Bei zahlreichen Metallen, Legierungen und nichtmetallischen Verbindungen steigt die elektrische Leitfähigkeit bei einer Temperatur

Tafel 2.1. Anzahl der frei beweglichen Elektronen und der Atome einiger Leiterwerkstoffe

Leiterwerkstoff	Anzahl der frei beweglichen Elektronen je cm ³	Anzahl der Atome je cm ³
Silber	$3,6 \cdot 10^{22}$	$5,85 \cdot 10^{22}$
Kupfer	$3,4 \cdot 10^{22}$	$8,4 \cdot 10^{22}$
Aluminium	$2,2 \cdot 10^{22}$	$8,25 \cdot 10^{22}$
Platin	$1,4 \cdot 10^{22}$	$6,6 \cdot 10^{22}$
Zink	$5,8 \cdot 10^{21}$	$6,6 \cdot 10^{22}$
Blei	$4,5 \cdot 10^{21}$	$3,3 \cdot 10^{22}$
Quecksilber	$4,3 \cdot 10^{20}$	$4,09 \cdot 10^{22}$

in der Nähe des absoluten Nullpunktes sprungartig auf sehr hohe Werte an. Diese Erscheinung wird als Supraleitung bezeichnet. Die Kryotechnik untersucht diese Erscheinungen und wendet sie technisch für verlustarme Energieübertragung an. Die Bedeutung dieses jungen Zweiges der Elektrotechnik wird weiter wachsen.

Ionenleiter
(Leiter 2. Klasse)

Ladungsträger sind positive Ionen (Kationen) und negative Ionen (Anionen).

Zu den Ionenleitern gehören

- Elektrolyte,
- ionisierte Gase (Plasma).

Durch die Ionenbewegung tritt ein Stofftransport auf.

Halbleiter

Ladungsträger sind Elektronen und Defektelektronen. Hinsichtlich der Anzahl frei beweglicher Ladungsträger nehmen sie eine Zwischenstellung zwischen Leitern und Nichtleitern ein. Im Vergleich zu Kupfer beträgt die Anzahl der freien Elektronen je Volumeneinheit etwa den 10⁹-ten Teil.

Wichtige Halbleiterwerkstoffe sind

- Germanium, Silizium, Selen und deren Verbindungen,
- Graphit,
- Indiumverbindungen,
- Galliumverbindungen.

Hinweis

Siehe dazu auch „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

Nichtleiter
(Isolierstoffe)

Enthalten keine oder nur wenige frei bewegliche Ladungsträger.

Wichtige Nichtleiter sind

- Vakuum und Gase unter bestimmten Bedingungen,
- Öle, Fette, Benzine, Alkohole, destilliertes Wasser,
- Glimmer, Quarz, Marmor, Schiefer, Bernstein,
- Harz, Holz, Lacke, Hartpapier, Keramik.

Hinweis

Vgl. hierzu Tafel 4.1.

3. Elektrische Erscheinungen in Leitern

3.1. Elektrisches Strömungsfeld

Begriffsbestimmung
„elektrisches
Strömungsfeld“

Das elektrische Strömungsfeld ist das Feld bewegter elektrischer Ladungen.

Wesen und
Erscheinungen

Das elektrische Strömungsfeld

- ist ein räumlicher Zustand der Materie,
- ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie,
- bildet sich in Leitern aus.
- Die Meßgrößen sind richtungsbehaftet (Vektorfeld).
- Die Feldlinien sind in sich geschlossen.

Wirkungen

Das elektrische Strömungsfeld ist nur an seinen Wirkungen erkennbar und nachweisbar. Die Wirkungen sind die des elektrischen Stromes (vgl. Abschn. 3.3.1.2.).

3.2. Darstellung und Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes

Feldlinien

Sie veranschaulichen das elektrische Strömungsfeld und stellen die makroskopischen Bahnen der bewegten Ladungsträger dar. Sie werden als Strom- oder Strömungslinien bezeichnet. Der Verlauf des Strömungsfeldes wird durch Stromlinien veranschaulicht.

- Die Stromlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Stromlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des Strömungsfeldes.
- Infolge des Kraftwirkungsgesetzes (vgl. Abschn. 2.1.) wirken Zugkräfte längs der Stromlinien und Druckkräfte quer zu den Stromlinien.
- Die Stromlinien sind in sich geschlossen.

Richtung der
Feldlinien

Festlegung: Die Feldlinien (Stromlinien) im elektrischen Strömungsfeld verlaufen in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger.

Arten elektrischer
Strömungsfelder

Parallel-homogene
Felder linienhafter
Leiter

Strömungsfelder sind homogen, wenn die Stromlinien parallel zueinander verlaufen und überall die gleiche Dichte aufweisen.

Inhomogene Felder

Strömungsfelder sind inhomogen, wenn eine der Bedingungen für ein homogenes Feld nicht erfüllt ist.

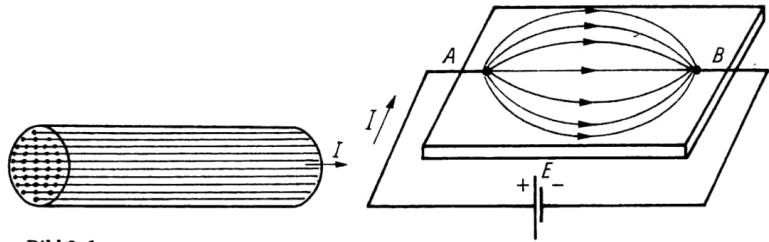


Bild 3.1
Strömungsfeld eines linienhaften Leiters
mit gleichbleibendem Querschnitt

Bild 3.2
Strömungsfeld eines
flächenhaften Leiters

3.3. Meßgrößen des elektrischen Strömungsfeldes

Das elektrische Strömungsfeld kann durch physikalische Größen beschrieben und erfaßt werden.
Dabei sind zu unterscheiden:

- Wirkungsgrößen,
- Bedingungsgrößen (Vermittlungsgrößen),
- Ursachengrößen.

Diese Größen erfassen mathematisch die Zusammenhänge zwischen Wesen und Erscheinungen des Feldes, kennzeichnen den Einfluß geometrischer Abmessungen und beschreiben die verschiedenen Materialien unter Einwirkung des Feldes.

Physikalische Größe Eine physikalische Größe läßt sich als Produkt eines Zahlenwertes und einer standardisierten Einheit ausdrücken.

Physikalische Größe = Zahlenwert · Einheit

3.3.1. Strom, Stromstärke und Stromdichte

3.3.1.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen

Begriffsbestimmung
„Wirkungsgröße
Strom“

Der elektrische Strom ist die Gesamtheit aller durch den elektrischen Leiter in einer Richtung bewegten Ladungen. Er bewirkt die elektrischen Erscheinungen im Leiter. Träger von bewegten elektrischen Ladungen können Elektronen oder Ionen sein.

Hinweis

Bei Halbleiterwerkstoffen sind auch Defektelektronen Träger elektrischer Ladungen.

Der Verlauf der Stromlinien, der Bahnen der bewegten Ladungsträger, entspricht der räumlichen Verteilung des Stromes im Strömungsfeld.

Stromröhre

Der Raum zwischen benachbarten Stromlinien wird als Stromröhre bezeichnet (Bilder 3.3 und 3.4). In dieser Stromröhre fließt ein bestimmter Teilstrom ΔI . Somit setzt sich der Gesamtstrom, der

durch einen Leiter fließt, aus den Teilströmen aller Stromröhren zusammen.

$$I = \sum \Delta I$$

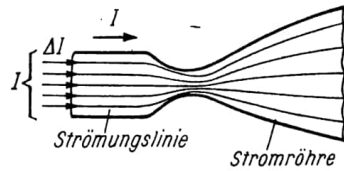


Bild 3.3
Strömungsfeld eines Leiters mit Querschnittsveränderung

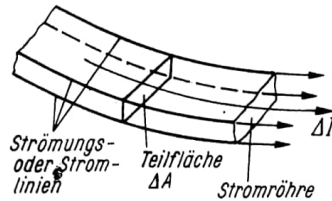


Bild 3.4
Darstellung einer Stromröhre

Die Intensität der Wirkungen des Stromes wird durch die Stromstärke ausgedrückt.

Begriffsbestimmung
„Stromstärke“

Die Stromstärke ist die in einem Zeitabschnitt Δt durch den Querschnitt eines Leiters bewegte Elektrizitätsmenge ΔQ .

Formelzeichen

I

Physikalischer
Zusammenhang

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

(3.1)

Einheit

Ampere

$[I] = 1 \text{ A}$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

1 kA = 1 Kiloampere = 10^3 A

1 mA = 1 Milliampere = 10^{-3} A

1 μA = 1 Mikroampere = 10^{-6} A

1 nA = 1 Nanoampere = 10^{-9} A

Ampere

Grundeinheit. Sie wird mit Hilfe der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes (vgl. Abschn. 3.3.1.2.) festgelegt und durch eine Kraftmessung bestimmt (vgl. Abschn. 5.9.3.). (André Marie Ampère, 1775–1836, französischer Physiker)

Tafel 3.1. Technische Richtwerte für Größenordnungen der Stromstärke

Geräte/Bauelemente	Stromstärke A	Geräte/Bauelemente	Stromstärke A
Telefonfern Hörer	10^{-5}	Elektrische Haushalt- wärmegeräte	2...10
Elektronenröhren	$10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1}$	Straßenbahnmotoren	200...400
Halbleiterbauelemente	$10^{-3} \dots 10^3$	Elektroschweißgerät	500
Glühlampen und Scheinwerferlampen	$10^{-1} \dots 10^2$	Gasgleichrichter	$1 \cdot 10^3$
		Aluminiumschmelz- ofen	$16 \cdot 10^3$
		Elektrostahlöfen	$12 \cdot 10^4$

Elektrizitätsmenge

Formelzeichen

Q

Physikalischer
Zusammenhang

$$Q = I t$$

(3.1a)

Einheit

Coulomb

$$[Q] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} \\ = 1 \text{ C}$$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ A} \cdot \text{h} = 1 \text{ Amperestunde} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s} \\ = 3,6 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{s}$$

Coulomb

Elektrizitätsmenge, die während 1 s bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A durch den Querschnitt des Leiters bewegt wird. (Charles-Augustin de Coulomb, 1736–1806, französischer Physiker)

Betrag der Elementarladung e

$$e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Definition der
Stromrichtung

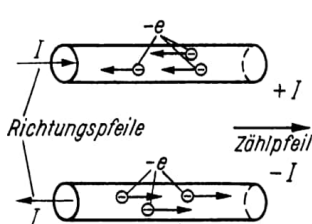
Die Stromrichtung ist positiv definiert in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger.

Diese festgelegte Stromrichtung wurde früher irreführend als „technische Stromrichtung“ bezeichnet.

Elektronen bewegen sich also entgegen der festgelegten positiven Stromrichtung. Stromrichtung wird durch Richtungspfeile angegeben.

Zählpfeile

Werden häufig in elektrotechnischen Schaltungen verwendet. Der Zählpfeil einer Größe gibt an, daß die Größe in der angegebenen Richtung positiv gezählt wird. Die Richtung des Zählpfeiles kann willkürlich festgelegt werden.



$$\left. \begin{array}{l} +I \\ -I \end{array} \right\} \text{gleiche Aussage,} \\ \leftarrow \text{denn es gilt} \\ -I = -(+I) = +(-I).$$

Bild 3.5
Zur Erläuterung des Zählpfeils

Durch die Wahl eines Zählpfeiles können positive oder negative Vorzeichen bei den Stromstärken auftreten.

Hinweis

Bei der Berechnung von elektrischen Schaltungen mit unbekannter Stromrichtung wird die Richtung des Zählpfeiles willkürlich festgelegt. Hat im Ergebnis die errechnete Stromstärke einen negativen Wert, entsprach die festgelegte Richtung nicht der Stromrichtung in dieser Schaltung.

Erscheinungen
des Stromes

Der Strom ist

- eine räumliche Erscheinungsform der Materie;
- eine in sich geschlossene, gerichtete Erscheinung;
- die Wirkungsgröße der elektrischen Erscheinungen im Leiter;

- nur an seinen Wirkungen erkennbar;
- mit einer Erwärmung des Leiters verbunden.

Hinweis

Eine Ausnahme bilden Supraleiter (vgl. Abschn. 2.2.);

- in Ionenleitern mit einem Stofftransport verbunden;
- von einem Magnetfeld begleitet.

Grundmeßschaltung

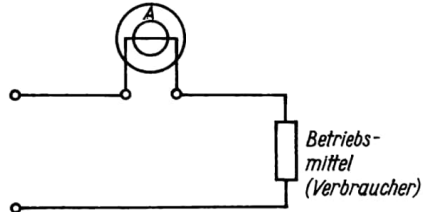


Bild 3.6. Grundschriftung für Stromstärkemessungen

Dichtegröße
Stromdichte

Beschreibt die Verteilung der Stromstärke ΔI in einer bestimmten, vom Strom durchsetzten Querschnittsfläche ΔA .

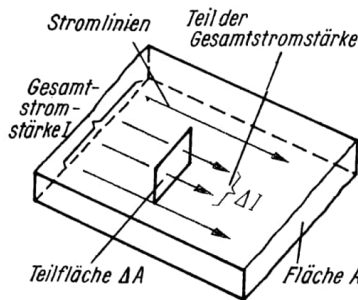


Bild 3.7
Zur Definition der Stromdichte

Die Stromdichte ist also ein Maß für die Stromdurchsetzung eines Leiters.

Formelzeichen

S

Physikalischer
Zusammenhang

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta A} \quad (3.2)$$

Einheit

$$[S] = 1 \frac{A}{m^2}$$

Hinweis

In der Praxis wird vorwiegend mit der Einheit $1 \frac{A}{mm^2}$ gerechnet.

Begriffsbestimmung
„Stromdichte“

Die Stromdichte ist die einem Gebiet des Feldes zugeordnete, die räumliche Strömung charakterisierende Größe. Die Dichte der Stromlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektrischen Strömungsfeldes.

Ist die Stromstärke gleichmäßig über die Fläche verteilt, gilt

$$S = \frac{I}{A} . \quad (3.2a)$$

Die Stromdichte ist eine wichtige Größe bei der Bemessung von Leiterquerschnitten. In TGL 200-0613 sind den standardisierten Leiterquerschnitten entsprechende Höchststromstärken zugeordnet (Strombelastbarkeit von Leitungen).

Tafel 3.2. Ausgewählte Belastbarkeiten elektrischer Leiterquerschnitte nach TGL 200-0613 (ohne Berücksichtigung von Einschränkungen)

Leiterquerschnitt mm ²	Belastbarkeit	
	Kupferleiter A	Aluminiumleiter A
0,5	12	-
1	20	-
1,5	26	-
2,5	36	27
4	50	37
6	63	50
10	86	67
16	117	90
25	155	120
50	240	187
95	365	282
120	425	328
240	640	502
300	735	578

3.3.1.2. Wirkungen des elektrischen Stromes

Wärmewirkung	Bei der Bewegung durch den Leiter stoßen die Ladungsträger mit den Atomen des Metallgitters zusammen und übertragen ihnen dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie. Die Energieaufnahme der Atome äußert sich in ihrer größeren thermischen Bewegung und einer Temperaturerhöhung des Werkstoffs. Die Energie der Ladungsträger wandelt sich in Wärmeenergie um (s. hierzu Abschn. 3.8.1.2.).
Magnetische Wirkung	Bewegte elektrische Ladungsträger erzeugen in ihrer Umgebung ein magnetisches Feld. Elektromagnetische Erscheinungen werden im Abschn. 5. behandelt.
Chemische Wirkung	Durch den elektrischen Strom können chemische Reaktionen ausgelöst werden, z.B. Zersetzung dissoziierter chemischer Verbindungen in stromdurchflossenen Flüssigkeiten.
Lichtwirkung	Nach Energieaufnahme können Atome, Moleküle oder Ionen Lichtenergie in Form elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen des sichtbaren Spektrums wieder abgeben. Es werden Temperaturstrahler (mit Wärmewirkung verbunden) und Lumineszenzstrahler unterschieden (s. hierzu Abschn. 3.8.1.2.).
Wirkungen auf den Menschen	Sind abhängig von <ul style="list-style-type: none"> ● Einwirkdauer, ● Stromstärke, ● Stromweg im menschlichen Körper,

- Frequenz,
- körperlicher Verfassung und dem Gewicht des Menschen.

Die Empfindlichkeit des Menschen gegenüber dem elektrischen Strom ist bei Wechselstrom bis 200 Hz größer als bei Gleichstrom. Sie ist von der Einwirkdauer und vom Stromweg abhängig. Die Stärke des Stromes ist vom jeweiligen Gesamtwiderstand des menschlichen Körpers, dieser wiederum von der anliegenden Spannung und der Einwirkzeit des Stromes abhängig.

Nützliche Wirkungen
(Elektromedizin)

Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren werden die Wirkungen des elektrischen Stromes bewußt in der Medizin zur Behandlung erkrankter Menschen mit Erfolg genutzt.

Schädigende Wirkungen (Unfallgefahr)

Unfälle durch elektrischen Strom bei unwillkürlicher Einwirkung des Stromes auf den Menschen (Tafel 3.3).

Ein Stromweg, in den der Herzmuskel einbezogen ist, hat stets lebensgefährliche oder tödliche Wirkungen.

Tafel 3.3. Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper

Stromstärkebereich	Physiologische Reaktion	Wechselstrom 15...200 Hz, Effektivwert	Gleichstrom
I	geringe Muskelkontraktionen in den Fingern Nervenschütterungen in den Fingern bis zum Unterarm Loslassen der Elektrode gerade noch möglich selbständiges Lösen von der Elektrode nicht mehr möglich	Blutdrucksteigerung, abhängig von der Stromstärke, kein Einfluß auf die Herzschlagfolge und das Reizleitungssystem 0,4...4 mA 0,8... 4,5 mA 6 ... 22 mA 8,5... 30 mA	1... 20 mA 25... 40 mA 40... 60 mA 60... 90 mA
II	noch ertragbare Stromstärke, ohne daß Bewußtlosigkeit eintritt, Blutdrucksteigerung, Herzunregelmäßigkeit; reversibler Herzstillstand bei höherer Stromstärke, teilweise auch schon Bewußtlosigkeit	25...80 mA	80... 300 mA
III	Herzkammerflimmern, in der Regel Bewußtlosigkeit	80 mA...8 A ¹⁾	250 mA...8 A
IV	wie Stromstärkebereich II, Blutdrucksteigerung, Herzstillstand, Arrhythmien; Lungenblähung, Verbrennungen, in der Regel Bewußtlosigkeit	> 3 A	> 3 A

¹⁾ Die Werte gelten für Ströme, die über 1 s lang fließen.

Unfallverhütung

Um Unfällen durch den elektrischen Strom vorzubeugen, sind die Sicherheitsvorschriften unter allen Umständen einzuhalten.

Besonders zu beachtende Vorschriften:

- ABAO 900/1
- TGL 200-0601
- TGL 200-0602
- TGL 200-0611
- TGL 200-0619

3.3.2. Ursprung, Spannungsabfall, Feldstärke, Potential, Pegel

3.3.2.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen

Ladungsträger sind stets massebehaftet. Um diese (wenn auch äußerst geringen) Massen bewegen zu können, ist Energie erforderlich.

Begriffsbestimmung
„elektrische
Spannung“

Die elektrische Spannung ist die Energiedifferenz ΔW einer Elektrizitätsmenge ΔQ zwischen zwei Punkten A und B, bezogen auf diese Elektrizitätsmenge.

Formelzeichen

U

Physikalischer
Zusammenhang

$$U = \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta Q}$$

(3.3)

Einheit

Volt

$$[U] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

- 1 MV = 1 Megavolt = 10^6 V
- 1 kV = 1 Kilovolt = 10^3 V
- 1 mV = 1 Millivolt = 10^{-3} V
- 1 μ V = 1 Mikrovolt = 10^{-6} V

Tafel 3.4. Spannungsbereiche in der Elektrotechnik

Bezeichnung	Spannungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Kleinspannung	$0 < U \leq 42 \text{ V}$	elektromechanisches Spielzeug
Niederspannung	$0 \text{ V} < U \leq 1 \text{ kV}$	Betriebsnetze aller Art, Haushalte, Gewerbe
Mittelspannung	$1 \text{ kV} < U \leq 30 \text{ kV}$	Hochspannungsfreileitungen und -kabel
Hochspannung	$1 \text{ kV} < U \leq 110 \text{ kV}$	
Höchstspannung	$110 \text{ kV} < U \leq 1 \text{ MV}$	Höchstspannungsfreileitungen (Stand 1975)

Tafel 3.5. Technische Richtwerte für Größenordnungen der Spannung

Einrichtung	Spannung V	Einrichtung	Spannung V
Antennenspannung	$(5 \dots 50) \cdot 10^{-6}$	Straßenbahn, U- und S-Bahn	500 ... 800
Nervenspannung	$(0,5 \dots 5) \cdot 10^{-2}$	Zündkerze im Kraftwagenmotor	$(5 \dots 15) \cdot 10^3$
Bleiakkumulatorzelle	2	Fahrdrahtspannung der Deutschen Reichsbahn	$15 \cdot 10^3$
Fahrraddynamo	6		
Elektrokarren	bis 80	Röntgenröhren	bis $2 \cdot 10^5$
Hausspannungsanschluß	220 oder 380	Bandgeneratoren	bis $5 \cdot 10^6$

Volt

Ein Volt ist die Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W (s. Abschn. 3.8.2.) umgesetzt wird. (Alessandro Volta, 1745–1827, italienischer Physiker)

Bei Bewegung einer Elektrizitätsmenge ΔQ sind zwei Möglichkeiten des Energieaustausches vorhanden:

- Erhöhung der Energie der Ladungsmenge,
- Energieabgabe der Ladungsmenge.

Entsprechend diesen beiden Möglichkeiten wird zwischen Urspannung und Spannungsabfall unterschieden.

Ursachengröße Urspannung

Ist die in einer Spannungsquelle „erzeugte“ Spannung. Die Spannungsquelle erhöht die Energie der Ladungsträger. Die Urspannung charakterisiert den Bewegungsdrang der Ladungsträger. Sie ist die Ursache des Stromflusses.

Energieaufnahme durch Energieumwandlung.

Hinweis

In neuen Standards wird die Urspannung als Quellenspannung bezeichnet.

Die Bezeichnung „Spannungsquelle“ (auch „elektrische Energiequelle“) kennzeichnet lediglich die Umwandlungsstelle verschiedener Energiearten in elektrische Energie (vgl. Abschn. 1.3.).

Formelzeichen

$\times U_0$

Physikalischer
Zusammenhang

$$U_0 = \frac{\Delta W_{AB \text{ zugef}}}{\Delta Q}$$

(3.3 a)

Einheit

Volt

$$[E] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

Allgemeines Schaltzeichen
einer (Gleich-)Urspannungsquelle

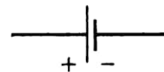


Bild 3.8.

Definition der Richtung der Urspannung

Die Urspannung ist positiv definiert in Antriebsrichtung positiver Ladungsträger.

Die Richtung der Urspannung wird durch Richtungspfeile gekennzeichnet (Bild 3.9).

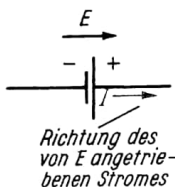


Bild 3.9. Richtungsfestlegung der Urspannung

Spannungsabfall

Ist die Energieabgabe ΔW einer Elektrizitätsmenge ΔQ zwischen zwei Punkten A und B, bezogen auf diese Elektrizitätsmenge.

Energieabgabe durch Energieumwandlung

Die Ursache des Spannungsabfalls ist der elektrische Strom.

Formelzeichen U_{AB}

Physikalischer
Zusammenhang

$$U_{AB} = \frac{\Delta W_{AB \text{ abgeg}}}{\Delta Q} \quad (3.3b)$$

Einheit

Volt

$$[U] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

Definition der Richtung des Spannungsabfalls

Der Spannungsabfall ist positiv definiert in Bewegungsrichtung positiver Ladungen.

Grundmeßschaltung

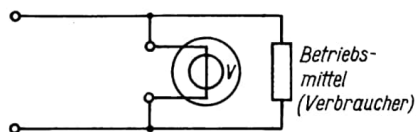


Bild 3.10. Grundschialtung für Spannungsmessungen

Die Richtung des Spannungsabfalls wird durch Richtungspfeile gekennzeichnet.

Wie beim elektrischen Strom können auch Zählpfeile verwendet werden. Bei Gleichspannungen wählt man den Spannungs-Zählpfeil in Richtung des Strom-Zählpfeiles, um positive Ergebnisse zu erhalten (Bild 3.11).

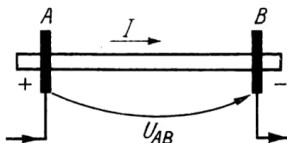


Bild 3.11
Richtungsfestlegung des Spannungsabfalls

Um die Größe der Kraftwirkungen auf Ladungen im elektrischen (Strömungs-) Feld beschreiben zu können, wird die elektrische Feldstärke eingeführt.

Feldstärke

Formelzeichen E

Physikalischer
Zusammenhang

$$E = \frac{F}{Q} \quad (3.4)$$

Begriffsbestimmung
„elektrische
Feldstärke“

Die elektrische Feldstärke ist eine Meßgröße des elektrischen Feldes, die die Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes und des elektrostatischen Feldes beschreibt (vgl. Abschnitt 4.3.2.).

Befindet sich eine Ladung Q im Kraftfeld einer anderen Ladung, so ist die Kraft F proportional der Ladung.
Die elektrische Feldstärke bildet den Proportionalitätsfaktor der Beziehung

$$F \sim Q.$$

Sie kann auch als Maß für den Spannungsabfall zwischen zwei betrachteten Feldpunkten bezeichnet werden.

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (3.5)$$

Einheit $[E] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}}$

Potential

Treten in einer Schaltung mehrere Spannungen auf, wird häufig ein gemeinsamer Bezugspunkt für alle Spannungen gewählt.

Ein elektrisches Potential ist die Anhäufung einer bestimmten Ladungsträgermenge gleicher Polarität.

Dabei wird das Potential als die auf einen Punkt bezogene Spannung ausgedrückt.

Der Bezugspunkt ist Potentialnullpunkt. Er ist frei wählbar (z.B. unendlich weit entfernt; Erde, Masse) und hat das Potential Null.

Formelzeichen φ (Phi)

Physikalischer Zusammenhang $\varphi = U_1 - U_0$

U_1 Spannung am Punkt 1,
 U_0 Spannung am Potentialnullpunkt

Einheit $[\varphi] = 1 \text{ V}$

Die Potentiale erhalten die gleichen Vorzeichen wie die Spannungsabfälle vom jeweiligen Punkt zum Bezugspunkt.

Potentialdifferenz

Die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten einer Schaltung ist gleich der Differenz der Potentiale beider Punkte (Bild 3.12).

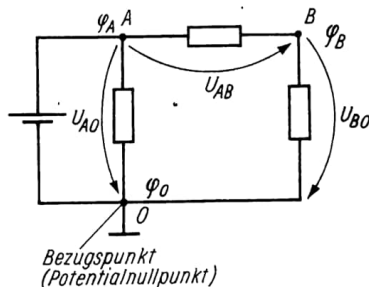


Bild 3.12
Zur Potentialbetrachtung

Es gilt

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B. \quad (3.6)$$

$$U_{AB} > 0, \text{ wenn } \varphi_A > \varphi_B;$$

$$U_{AB} < 0, \text{ wenn } \varphi_A < \varphi_B.$$

$$\varphi_A = U_{A0} - 0; \quad \varphi_B = U_{B0} - 0;$$

$$U_{AB} = U_{A0} - U_{B0}.$$

Man formuliert z. B. solche bezogenen Aussagen (vgl. Bild 3.13):
 Die Spannung am Punkt A ist negativer als die Spannung am Punkt D
 der Schaltung.
 Beide Spannungen sind positiv gegenüber dem Potentialnullpunkt.

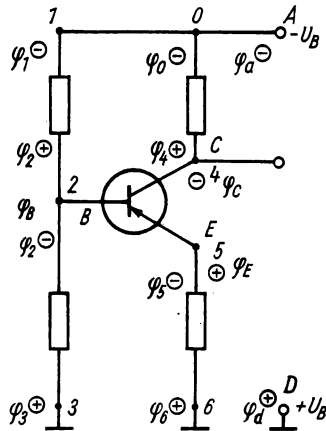


Bild 3.13
 Schaltbeispiel zur Potentialbetrachtung

Aus Bild 3.13 folgt auch:

1. $\varphi_a = \varphi_0 = \varphi_1$,
 $\varphi_d = \varphi_6 = \varphi_3$.
2. φ_1 ist negativ gegenüber φ_2 .
3. φ_2 ist negativ gegenüber φ_3 .
4. φ_2 ist weniger negativ als φ_1 , bezogen auf φ_3
 usw.

Daraus ergibt sich:

... weniger negativ \Rightarrow positiv.
 ... weniger positiv \Rightarrow negativ.

Diese Betrachtungsweise ist für das Verstehen elektronischer Schaltungen sehr bedeutsam.

Pegel

Ein Pegel kennzeichnet oder legt fest, welche Spannung oder welches Potential an bestimmten Schaltungspunkten oder beim Einsatz bestimmter Schaltungen vorhanden sein müssen.

Vor allem in der Informationselektrotechnik (z. B. Elektroakustik,

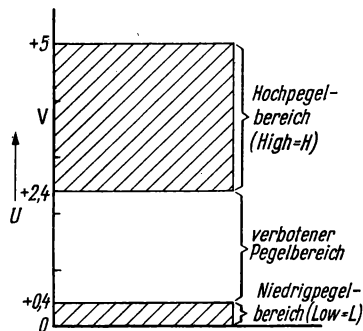


Bild 3.14
 Logikpegel von TTL-Schaltkreisen
 (Beispiel)

Signalübertragungstechnik) und in der elektronischen Datenverarbeitung verwendet.

Ein typisches Anwendungsgebiet sind die integrierten Schaltkreise (vgl. Bild 3.14). Hier werden Pegelbereiche angegeben.

3.3.2.2. Ursprungserzeugung

Prinzip	In jeder Anordnung, in der eine Ladungstrennung erfolgt, wird eine elektrische Ursprungserzeugung erzeugt.
Verfahren	<p>Ursprungserzeugung durch</p> <ul style="list-style-type: none"> • elektromagnetische Induktion (z.B. in Generatoren), • chemische Vorgänge (z.B. bei galvanischen Elementen), • thermoelektrische Verfahren (z.B. mit Thermoelementen), • Lichteinwirkung auf bestimmte Materialien (z.B. auf Fotoelemente, Fotodioden, Fototransistoren). <p>In jedem Fall wird die elektrische Ursprungserzeugung durch Energieumwandlung anderer Energiearten in elektrische Energie gewonnen.</p> <p>Hinweis</p> <p>Vgl. hierzu Abschn. 3.8.1.2.</p>

3.3.3. Elektrische Leitfähigkeit – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Stromdichte

Einfluß des Materials	<p>Im Zusammenhang zwischen Feldstärke und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß des Leitermaterials zum Ausdruck. Die Stromdichte ist proportional der Feldstärke.</p> <p>Der Proportionalitätsfaktor ist eine vom Material abhängige Konstante.</p>
Elektrische Leitfähigkeit	<p>Die Materialkonstante wird als elektrische Leitfähigkeit κ (Kappa) bezeichnet.</p> <p>Physikalischer Zusammenhang</p>
Begriffsbestimmung	<p>Die elektrische Leitfähigkeit κ eines Werkstoffs ist ein Maß für das Vermögen, den elektrischen Strom zu leiten. Sie ist abhängig von der Konzentration der Leitungselektronen (vgl. Tafel 2.1) und von der Ladungsträgerbeweglichkeit.</p>
Spezifischer Widerstand	<p>Der reziproke Wert der Leitfähigkeit wird als spezifischer Widerstand ρ (Rho) bezeichnet.</p>

$$S = \kappa E \quad (3.7)$$

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (3.8)$$

Hinweis

Vgl. hierzu Abschn. 3.4.1.2. und Tafel 3.7.

3.4. Zusammenhänge zwischen Spannung und Strom im elektrischen Strömungsfeld

3.4.1. Elektrischer Widerstand

3.4.1.1. Elektrischer Leitwert und elektrischer Widerstand

Bedingungsgröße
des elektrischen
Strömungsfeldes

Es wird definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Hinweis

Ebenso kann der reziproke Wert des Quotienten definiert werden.

Elektrischer
Leitwert

Im elektrischen Strömungsfeld wird der elektrische Leitwert als Bedingungsgröße eingeführt.

Formelzeichen

G

Physikalischer
Zusammenhang

$$G = \frac{I}{U}$$

(3.9)

(Gültigkeitsbedingung: homogener, linearer, gleichmäßig temperierter Leiter.)

Einheit

Siemens

$$[G] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ S}$$

(Werner von Siemens, 1816–1892, deutscher Ingenieur)

Eigenschaft
Leitvermögen

Der Leitwert G ist ein Maß für die Stromdurchlässigkeit eines Leiters.

Je kleiner das Leitvermögen eines elektrischen Leiters ist, um so mehr widersetzt er sich dem Durchfluß des elektrischen Stroms, d.h., um so kleiner ist der Leitwert.

Bei besserem Leitvermögen ist die stromvermindernde Wirkung geringer.

Diese Eigenschaften können einem elektrotechnischen Bauelement zugeordnet werden.

Elektrischer
Widerstand

Allgemeines
Schaltzeichen

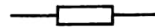


Bild 3.15.

Formelzeichen

R

Physikalischer
Zusammenhang

$$R = \frac{1}{G}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

(3.10); (3.11)

(Gültigkeitsbedingung: homogener, linearer, gleichmäßig temperierter Leiter.)

Einheit

Ohm

$$[R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = \frac{1}{\text{S}} = 1 \Omega$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ m}\Omega = 1 \text{ Milliohm} = 10^{-3} \Omega$$

$$1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ Kiloohm} = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 1 \text{ Megaohm} = 10^6 \Omega$$

Ohm

Ein Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt. (Georg Simon Ohm, 1789–1854, deutscher Physiker)

Grundbauelement
elektrischer
Widerstand

Grundbauelement des elektrischen Strömungsfeldes ist der elektrische Widerstand. Er ist das Bauelement, an dem konzentriert eine Energieumwandlung auftritt. Er wird meist industriell mit einem bestimmten Widerstandswert gefertigt.

Die Bezeichnung „Widerstand“ wird auch für die Eigenschaft elektrischer Leiter, Halbleiter und Nichtleiter, stromhemmend zu wirken, verwendet.

Begriffsbestimmung
„elektrischer
Widerstand“

Der elektrische Widerstand ist ein Maß für die Größe der Behinderung eines Stromflusses.

3.4.1.2. Bemessungsgleichung des elektrischen Widerstandes

Bemessung von
Widerständen

Der elektrische Widerstand ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vorausbestimmbar ist.

Der Widerstand eines Leiters ist um so größer,

- je größer der spezifische Widerstand ist,
- je länger der Leiter ist,
- je kleiner der Querschnitt des Leiters ist.

Unter der Voraussetzung eines homogenen Strömungsfeldes (Leiters) mit überall gleicher Stromdichte gilt

Bemessungs-
gleichung

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3.12)$$

oder mit Gleichung (3.8) $\rho = \frac{1}{\kappa}$

$$R = \frac{l}{\kappa A} \quad (3.12a)$$

R Widerstand in Ω ,

l Leiterlänge in m,

A Leiterquerschnitt in mm^2 ,

ρ spezifischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$,

κ Leitfähigkeit in $\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$.

3.4.1.3. Temperaturabhängigkeit von Widerständen

Der Widerstand eines Leiters wird nicht nur von den Abmessungen und den Materialeigenschaften, sondern auch von seiner Temperatur bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit von Widerständen ist mit den Bewegungsgesetzen von Ladungsträgern in den einzelnen Werkstoffen zu erklären.

Der Temperaturkoeffizient oder Temperaturbeiwert α drückt die Temperaturabhängigkeit aus.

Begriffsbestimmung
„Temperatur-
koeffizient“ α

Der Temperaturkoeffizient α ist die relative Widerstandsänderung je Grad Temperaturänderung.

Einheit $\frac{1}{\text{Kelvin}}$

$$[\alpha] = \frac{1}{K}$$

Tafel 3.6. Richtgrößen des Temperaturkoeffizienten einiger Leiterwerkstoffe

Leiterwerkstoff	α	Verhalten von R bei Temperaturerhöhung
Reine Metalle	$\approx + 4 \frac{0/00}{K}$	Zunahme von R
Spezielle Metallegierungen (z. B. Konstantan)	≈ 0	R \approx konst.
Halbleiter, (Kohle), Elektrolyte	< 0	Abnahme von R

Tafel 3.7. Spezifischer Widerstand ϱ , Leitfähigkeit κ und Temperaturkoeffizient α_{20} und β_{20} von Leiterwerkstoffen

Werkstoff	ϱ $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	κ $\text{S} \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$	α_{20} $\frac{1}{K}$	β_{20} $\frac{1}{K^2}$
Silber	0,016	62,5	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	0,01786	56	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Bronze	0,018...0,056	55...18	-	-
Gold	0,023	44	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	0,02857	35	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Magnesium	0,045	22	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Wolfram	0,055	18	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Zink	0,063	16	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Messing	0,07...0,09	14...11	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-
Nickel	0,08...0,11	13... 9	$(3,7...6) \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Eisen	0,10...0,15	10... 7	$(4,5...6) \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Zinn	0,11	9,1	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Platin	0,11...0,14	9... 7	$(2...3) \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Blei	0,21	4,8	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Novokonstant ¹⁾	0,45	2,3	$0,01 \cdot 10^{-3}$	-
Konstantan ²⁾	0,5	2,0	$-0,35 \cdot 10^{-5}$	-
Quecksilber	0,96	1,04	$0,92 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Wismut	1,2	0,83	$4,2 \cdot 10^{-3}$	-

1) Novokonstant: 82,5 % Cu; 12 % Mn; 4 % Al; 1,5 % Fe

2) Konstantan: 54 % Cu; 45 % Ni; 1 % Mn

Es gilt

$$R_t = R_{20} \left[1 + \alpha_{20} (t - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}) \right] \quad (3.13)$$

R_t Widerstandswert bei Temperatur t in Ω ,

R_{20} Widerstandswert bei $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in Ω ,

α_{20} Temperaturkoeffizient für $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in $\frac{1}{\text{K}}$.

Gl. (3.13) gilt nur für Temperaturen bis etwa $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei höheren Temperaturen ist der Widerstand mit nachstehender Gleichung zu berechnen:

$$R_t = R_{20} \left[1 + \alpha_{20} (t - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}) + \beta_{20} (t - 20 \text{ }^{\circ}\text{C})^2 \right] \quad (3.14)$$

Der zweite Temperaturkoeffizient β hat die Einheit $1/\text{K}^2$.

3.4.2. Spannungs-Strom-Verhalten von Widerständen

Durch die Gleichung $R = \frac{U}{I}$ ist der Widerstand eines Leiters bei einer bestimmten Spannung bzw. einem bestimmten Strom festgelegt. Zur genaueren Kennzeichnung wird das Spannungs-Strom-Verhalten des Widerstandes betrachtet.

Kennlinie

Die grafische Darstellung der Funktion $U = f(I)$ ist die Kennlinie des Widerstandes.

Nach dem Verlauf der Kennlinien unterscheidet man

- lineare Spannungs-Strom-Charakteristik,
- nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik.

3.4.2.1. Lineare Spannungs-Strom-Charakteristik

Experimentell wurde von G.S. Ohm ermittelt, daß bei Metallen und Metallegierungen unter konstanten Bedingungen das Verhältnis von Spannung zu Stromstärke konstant ist.

Ohmsches Gesetz

$$R = \frac{U}{I} = \text{konst.} \quad (3.15)$$

Das Ohmsche Gesetz ist ein Naturgesetz.

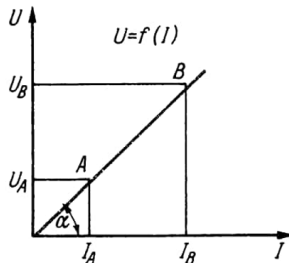


Bild 3.16
Kennlinie eines linearen Widerstandes

Linearer Widerstand Ändert sich U_{AB} proportional zur Stromstärke I (Bild 3.16)

$$U_{AB} = \text{konst.} \cdot I,$$

so gilt nach Gl. (3.11)

$$\frac{U_{AB}}{I} = R_{AB} = \text{konst.}$$

Man spricht von einem linearen oder ohmschen Widerstand.

3.4.2.2. Nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik

Nichtlinearer
Widerstand

Ändert sich U_{AB} bzw. ein beliebiges ΔU nicht proportional zu einer Stromstärkeänderung ΔI , bzw. ändert sich der Widerstand in Abhängigkeit von der Stromstärke (Bild 3.17), wird dieser als nichtlinearer Widerstand bezeichnet. Für nichtlineare Widerstände werden zwei charakteristische Kenngrößen definiert:

- Gleichstromwiderstand,
- differentieller Widerstand.

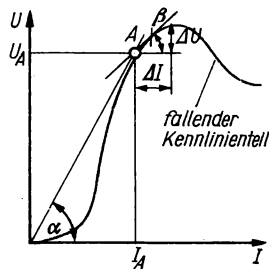


Bild 3.17
Kennlinie eines nichtlinearen
Widerstandes

Gleichstrom-
widerstand

Er wird durch das Steigungsmaß der Sekante vom Nullpunkt durch den Arbeitspunkt (z.B. A) bestimmt.

Der Gleichstromwiderstand ist stets positiv.

$$R = \frac{U_A}{I_A} \hat{=} \tan \alpha$$

Differentieller
Widerstand

Er kennzeichnet die Steigung der Kennlinie $U = f(I)$ in einem Punkt und ist definiert als Quotient einer Spannungsänderung und der entsprechenden Stromänderung in diesem Arbeitspunkt (z.B. A).

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \hat{=} \tan \beta$$

Im Gegensatz zum Gleichstromwiderstand kann der differentielle Widerstand auch negativ sein. Das ist der Fall, wenn eine Spannungszunahme mit einer Stromabnahme verbunden ist oder umgekehrt (fallende Kennlinie).

Die Nichtlinearität bestimmter Widerstände ist zurückzuführen auf

- Spannungsabhängigkeit (z.B. Varistoren),
- Temperaturabhängigkeit (z.B. Thermistoren),
- Lichtabhängigkeit (z.B. Fototransistoren).

Spannungsabhängige Widerstände

Die Kennlinien spannungsabhängiger Widerstände können unsymmetrisch (Verlauf 1 im Bild 3.18) oder symmetrisch (Verlauf 2 im Bild 3.18) sein. Der Verlauf gibt Aufschluß, ob der Stromfluß von der Spannungsrichtung (oder Polarität) abhängig ist.

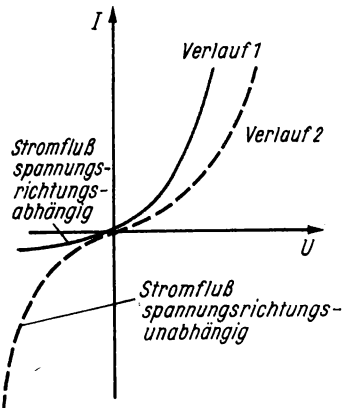


Bild 3.18
Kennlinie spannungsabhängiger Widerstände

Temperaturabhängige Widerstände

Temperaturabhängige nichtlineare Widerstände werden unterschieden in

- Kaltleiter (positiver Temperaturkoeffizient),
- Heißleiter (negativer Temperaturkoeffizient).

Der überwiegende Teil der Metalle sind Kaltleiter.

Kaltleiter mit hohem Temperaturkoeffizienten werden als Temperaturfühler, Stromkonstanthalter u. a. eingesetzt.

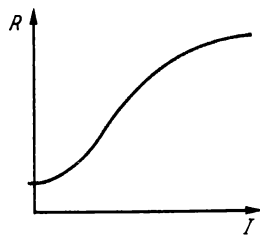


Bild 3.19
Widerstandsverlauf eines Kaltleiters

Heißleiter werden zur Temperaturmessung, zur Kompensation eines positiven Temperaturkoeffizienten (als Anlaß- und Regelheißleiter) verwendet. Sie bestehen aus Metalloxiden.

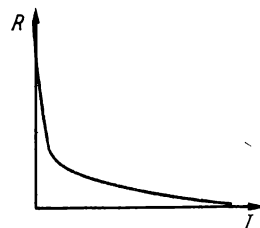
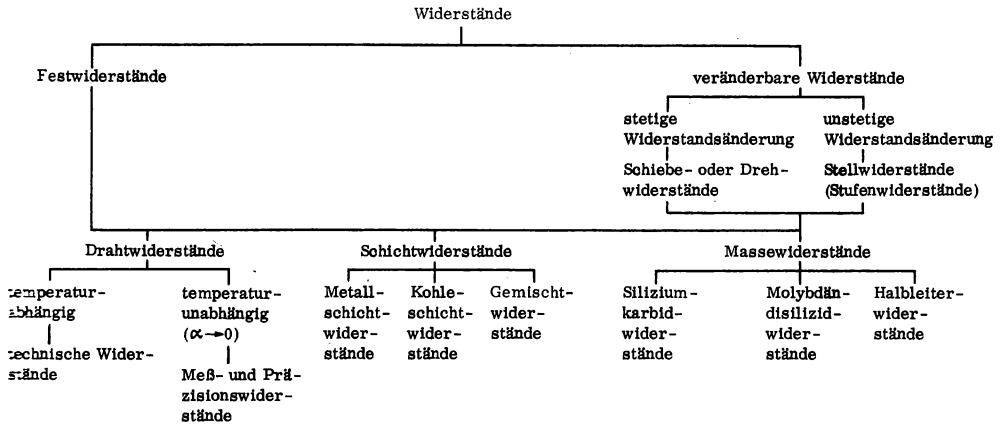


Bild 3.20
Widerstandsverlauf eines Heißleiters

Tafel 3.8. Einteilung von Widerständen



Hinweis: Siehe hierzu auch Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

3.5. Elektrische Stromkreise

3.5.1. Grundstromkreis und seine Elemente

Grundstromkreis Er ist eine Grundschialtung der Elektrotechnik, auf die sich auch komplizierte Schaltungen zurückführen lassen (Bild 3.21). Jeder Grundstromkreis besteht aus einem inneren Teil und einem äußeren Teil.

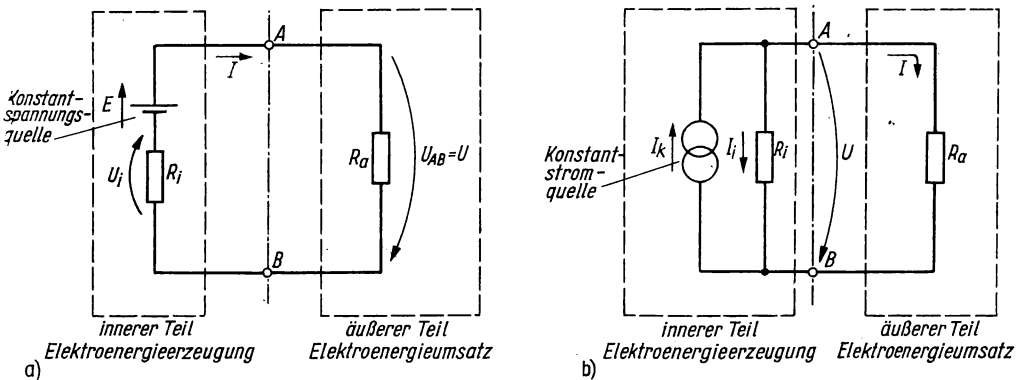


Bild 3.21. Ersatzschaltungen
a) Spannungsquellenersatzschaltungen
b) Stromquellenersatzschaltung

Innerer Teil

Er umfaßt die Spannungsquelle mit dem ihr zugeordneten Innenwiderstand R_i .

Die Spannungsquelle erzeugt eine Urspannung E .

In Schaltungen der Informationselektrotechnik (z.B. beim Einsatz von integrierten Analogschaltkreisen) wird oft eine „Stromquelle“ mit konstanter Stromergiebigkeit angegeben, die die Berechnungen vereinfacht („Konstantstromquelle“, „Einströmung“).

Bei der Spannungsquelle wird ein unendlich kleiner Innenwiderstand vorausgesetzt, dagegen bei der „Stromquelle“ ein unendlich großer.

Äußerer Teil

Er erfaßt das Betriebsmittel oder den „Verbraucher“ mit einem bestimmten Außenwiderstand R_a . Am Betriebsmittel steht die Klemmenspannung $U_{AB} = U$ zur Verfügung.

Aktiver Zweipol

Ein aktiver Zweipol ist eine elektrotechnische Energieumsatzstelle, die in der Lage ist, zwischen zwei Anschlußklemmen eine konstante elektrische Ursprungung zu erzeugen bzw. einen konstanten elektrischen Strom anzutreiben.

Der innere Widerstand veranschaulicht dabei den Energieumsatz im Inneren der Spannungsquelle.

Bild 3.22 wird als Spannungsquellenerersatzschaltung bezeichnet.

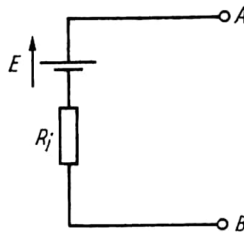


Bild 3.22. Spannungsquellenerersatzschaltung eines aktiven Zweipols

Passiver Zweipol

Ein passiver Zweipol ist eine elektrotechnische Energieumsatzstelle mit zwei Anschlüssen ohne innere Ursprungung, an der elektrische Energie in eine andere Energieform gewandelt wird.

Bei einem passiven Zweipol (Bild 3.23) muß die umgesetzte Energie nicht in jedem Fall aus dem Stromkreis heraustreten - (z. B. in Form von Wärme wie bei einem Widerstand, vgl. auch Abschnitte 4. und 5.).

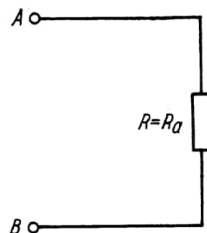


Bild 3.23
Passiver Zweipol

Berechnungsgrundlagen (Bild 3.21)

Nach dem Ohmschen Gesetz kann geschrieben werden

$$U_i = I R_i; U_{AB} = U = I R_a$$

Ursprungung

$$E = I(R_i + R_a) \quad (3.16)$$

Durch Verhältnissbildung entsteht

$$\frac{U}{E} = \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (3.16 a)$$

Klemmenspannung

$$U = E - I R_i \quad (3.16 b)$$

Strom

$$I = \frac{E}{R_i + R_a} \quad (\text{für } R_a \gg R_i) \quad (3.16 c)$$

Bei Kurzschluß der Spannungsquelle gilt

$$I_K = \frac{E}{R_i} \quad \text{für } R_a = 0. \quad (3.17 a)$$

Im Grundstromkreis ist in der Spannungsquellenersatzschaltung

$$I = \frac{E}{R_i + R_a} \quad (3.16 c)$$

Anstelle der Konstantspannungsquellenschaltung (Bild 3.21 a) ist also eine Konstantstromquellenschaltung denkbar (Bild 3.21 b).

Es gilt damit rechnerisch für die „Stromquelle“

$$\frac{I}{I_K} = \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (3.16 d)$$

3.5.2. Betriebszustände elektrischer Stromkreise

In jedem elektrischen Stromkreis sind die Belastungsverhältnisse von Bedeutung. Unter Belastung versteht man die durch den Widerstand angeschlossener Betriebsmittel beeinflusste größere oder kleinere Stromstärke.

Allgemein gilt

$I \uparrow \longrightarrow$ steigende Belastung,

$I \downarrow \longrightarrow$ fallende Belastung.

Ein Betriebszustand ist in der Elektrotechnik das Vorhandensein einer bestimmten Belastung.

Belastung

Sind Außenwiderstände bestimmter Größe vorhanden, so liegt Belastung der Spannungsquelle vor.

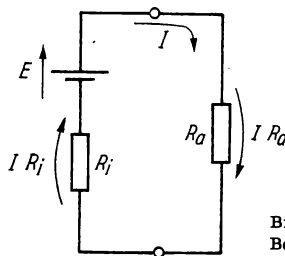


Bild 3. 24
Belastete Spannungsquelle

Dabei ist jeder beliebige Belastungsfall zwischen Kurzschluß und Leerlauf möglich.

$$0 < R_a < \infty$$

$$\infty > I > 0$$

Bei der Belastung werden in der Praxis noch andere Möglichkeiten unterschieden, z.B. Nennbelastung, Überbelastung, Unterbelastung, zulässige Dauerbelastung u.a.

Im Grundstromkreis ergeben sich folgende Verhältnisse bei Belastung:

$$\boxed{0 < R_a < \infty} \rightarrow \infty > I > 0 \rightarrow \boxed{U = E - I R_i} \quad (3.17)$$

$$\boxed{U < E}$$

Für jede belastete Spannungsquelle gilt:

Bei Belastung ist die Klemmenspannung stets kleiner als die erzeugte Urspannung.

Kurzschluß

Ein Kurzschluß ist eine widerstandslose Verbindung zweier oder mehrerer Potentialpunkte.

Er ist ein Extremfall der Belastung einer Spannungsquelle.

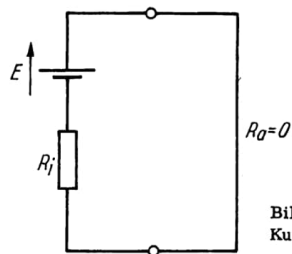


Bild 3.25
Kurzgeschlossene Spannungsquelle

Nähert sich der Außenwiderstand in einem geschlossenen Stromkreis dem Wert Null oder ist er gleich Null, so spricht man von einem Kurzschluß der Spannungsquelle.

In diesem Fall erreicht der Strom ein Maximum.

Allgemein gilt:

$$R_a \rightarrow 0 \text{ (Realfall)}$$

$$R_a = 0 \text{ (Idealfall)}$$

$$I \quad \text{Maximalwert}$$

Im Grundstromkreis gilt bei Kurzschluß:

$$\boxed{R_a = 0} \rightarrow I = I_K = \frac{E}{R_i} \rightarrow \boxed{U = 0} \quad (3.17a)$$

Im Realfall kann ein vollkommener Kurzschluß nicht erreicht werden, da ein absoluter Leiter (vgl. Abschn. 2.2.) in der Technik nicht vorhanden ist.

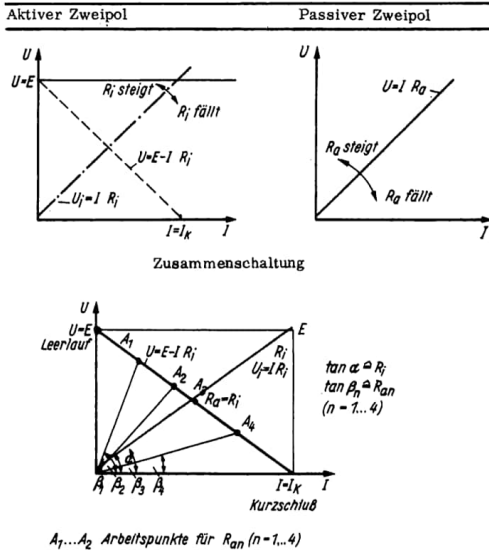
Für jede kurzgeschlossene Spannungsquelle gilt:

Bei einem Kurzschluß hat die Klemmenspannung den Wert Null.

Tafel 3.9. Gesamtverhalten des Grundstromkreises

	Leerlauf	Belastung	Kurzschluß	Anpassung
Außenwiderstand	$R_a = \infty$	$0 < R_a < \infty$	$R_a = 0$	$R_a = R_i$
Stromstärke	$I = 0$	$I = \frac{E}{R_i + R_a}$	$I = I_K = \frac{E}{R_i}$	$I = \frac{I_K}{2}$
Klemmen-spannung	$U = E$	$U = E - I R_i$	$U = 0$	$U = \frac{E}{2}$
Urspannung	E	E	E	E

Tafel 3.10. Funktionale Zusammenhänge im Grundstromkreis



$A_1 \dots A_2$ Arbeitspunkte für R_{an} ($n=1 \dots 4$)

Leerlauf

Ein Leerlauf liegt vor, wenn der Stromkreis zwischen aktivem und passivem Zweipol nicht geschlossen ist.

Er ist ein Extremfall der Belastung einer Spannungsquelle.

Nähert sich der Außenwiderstand in einem Stromkreis dem Wert unendlich oder ist er unendlich, so spricht man vom Leerlauf der Spannungsquelle. Der Strom erreicht ein Minimum oder wird gleich Null. Allgemein gilt:

$$\begin{aligned} R_a &\rightarrow \infty \text{ (Realfall)} \\ R_a &= \infty \text{ (Idealfall)} \\ I &\text{ Minimalwert} \end{aligned}$$

Im Grundstromkreis gilt bei Leerlauf:

$$\boxed{R_a = \infty} \rightarrow I = 0 \rightarrow \boxed{U = E}$$

(3.17b)

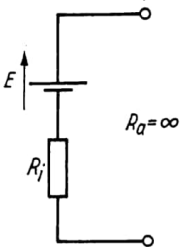


Bild 3.26. Spannungsquelle im Leerlauf

Im Realfall kann ein vollkommener Leerlauf nicht erreicht werden, da ein absoluter Nichtleiter (vgl. Abschn. 2.2.) in der Technik nicht existiert. Für jede leerlaufende Spannungsquelle gilt:

Bei Leerlauf hat die Klemmenspannung den Wert der Leerlaufspannung oder Ursprung.

Anpassung

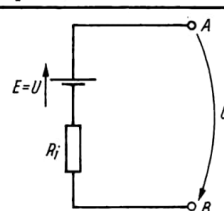
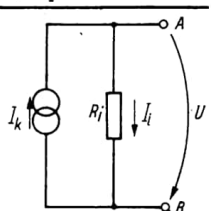
Ein Sonderfall der Belastung liegt vor, wenn Außenwiderstand und Innenwiderstand der Quelle gleich groß sind. Strom und Spannung betragen die Hälfte ihrer Maximalwerte. Dabei liegt am Außenwiderstand die höchstmögliche Leistung. (Vgl. Abschn. 3.8.3.)

Es gilt im Grundstromkreis:

$$\boxed{R_a = R_i} \longrightarrow I = \frac{E}{2R_i} = \frac{I_K}{2} \longrightarrow \boxed{U_{Ra} = \frac{E}{2}} \quad (3.17c)$$

Dieser Betriebsfall ist vor allem in der Informationselektrotechnik sehr bedeutsam.

Tafel 3.11. Ersatzdarstellungen aktiver Zweipole

	Spannungsquellen- ersatzschaltung	Stromquellen- ersatzschaltung
Ausgangspunkt	Leerlauf der Spannungs- quelle	Kurzschluß der Stromquelle
Ersatzschaltung		
Berechnung	$\frac{U}{E} = \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (3.16a)$	$\frac{I}{I_K} = \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (3.17)$
Praktische Anwendung	bei $R_i \ll R_a$ alle üblichen Spannungs- quellen (Primär- und Sekundär- elemente; Generatoren)	bei $R_i \gg R_a$ bei Berechnung elek- tronischer Schaltungen (z. B. mit Transistoren, integrierten Schaltkreisen)
Zweck	Nachbildung des Verhaltens nach außen	Nachbildung des Ver- haltens nach außen
Anwendungsbereich	Leistungselektrotechnik	Informations- elektrotechnik

3.6. Erweiterte Stromkreise und ihre Berechnungsgesetze

3.6.1. Arten erweiterter Stromkreise, Begriffsbestimmungen

Erweiterter
Stromkreis

Liegt vor, wenn in einem elektrischen Stromkreis mehr als eine Spannungsquelle oder (und) mehr als ein Betriebsmittel (Verbraucher) vorhanden sind. Spannungsquellen und Verbraucher können in vielfältiger Weise durch Leitungen verknüpft sein.

Unverzweigter
Stromkreis

Reihenschaltung (Serien- oder Hintereinanderschaltung) der Stromkreiselemente (Bild 3.27).

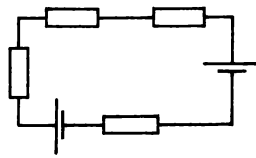


Bild 3.27
Reihenschaltung

Verzweigter
Stromkreis

Parallelschaltung (Nebeneinanderschaltung) oder Gemischtschaltung der Stromkreiselemente (Bilder 3.28 und 3.29).

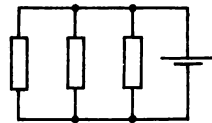


Bild 3.28
Parallelschaltung

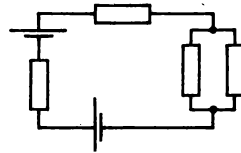


Bild 3.29
Gemischtschaltung

Netzwerk

Zusammenschaltung mehrerer Stromkreise.

Knotenpunkt

Punkt im Stromkreis, in dem eine Stromverzweigung auftritt.

Zweig

Der zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten liegende Stromkreisteil, wenn in ihm mindestens eine Spannungsquelle und (oder) ein Verbraucher enthalten sind.

Masche

Die Aneinanderreihung von Zweigen zu geschlossenen Umläufen (Bild 3.30).

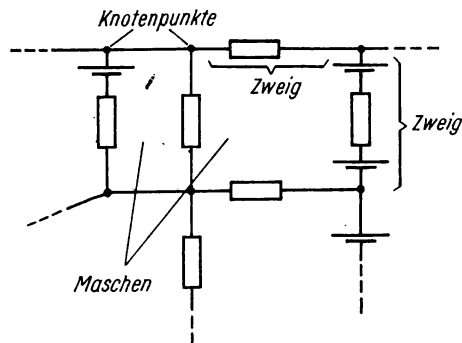


Bild 3.30. Zu den Begriffen Knotenpunkt, Zweig, Masche

Vermaschter
Stromkreis

Zusammenschaltung mehrerer Spannungsquellen und Betriebsmittel in verschiedenen Zweigen.

3.6.2. Kirchhoffsche Gesetze

Knotenpunktsatz
(1. Kirchhoffsches
Gesetz)
(Gustav Robert
Kirchhoff,
1824-1887,
deutscher Physiker)

Da der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung ist, gilt:

Die Summe aller zum Knotenpunkt hinfließenden Ströme ist gleich der Summe aller vom Knotenpunkt wegfließenden Ströme.

$$\sum_{k=1}^n I_k = \sum_{l=1}^m I_l \quad (3.18)$$

Aus Gl. (3.18) folgt

$$\sum_{k=1}^n I_k - \sum_{l=1}^m I_l = 0, \quad (3.18a)$$

$$\downarrow$$

$$\sum_{n=1}^z I_n = 0. \quad (3.18b)$$

Die vorzeichenbehaftete Summe aller Ströme in einem Knotenpunkt ist Null.

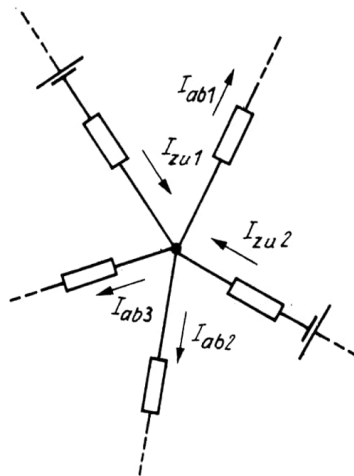


Bild 3.31
Zur Ableitung des Knotenpunktsatzes

Hinweis

In Gl. (3.18b) sind in den z Zweigströmen für die zum Knotenpunkt hinfließenden und für die vom Knotenpunkt wegfließenden Ströme unterschiedliche Vorzeichen festzulegen.

Maschensatz
(2. Kirchhoffsches
Gesetz)

Für die Spannung längs eines geschlossenen Umlaufs (Masche) ergibt sich aus der Spannungsdefinition und aus dem Satz von der Erhaltung der Energie:

Die von den Ladungsträgern abgegebene Energie ist gleich der diesen Ladungsträgern zugeführten Energie.

$$W_{\text{zugef}} = W_{\text{abgeg}}$$

Für den im Bild 3.32 dargestellten Stromkreis gilt nach den Zählpfeilfestlegungen (vgl. Abschn. 3.3.1.1.)

$$W_{E1} - W_{E2} = W_{AB} + W_{CD} + W_{EA}.$$

Mit den Gln. (3.3 a) und (3.3 b) gilt

$$E_1 Q - E_2 Q = U_{AB} Q + U_{CD} Q + U_{EA} Q$$



$$E_1 - E_2 = U_{AB} + U_{CD} + U_{EA}.$$

Es ergibt sich

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m U_l.$$

(3.19)

In einer Masche ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe der Spannungsabfälle über den inneren und äußeren Widerständen.

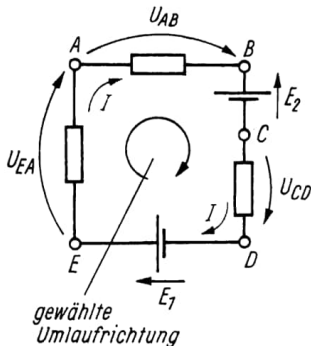


Bild 3.32
Zur Ableitung des Maschensatzes

Hinweis

Zur Festlegung der Vorzeichen wird eine willkürliche Umlaufrichtung gewählt. Liegen die Zählpfeile in dieser Umlaufrichtung, so sind die entsprechenden Größen in Gl. (3.19) positiv einzusetzen, anderenfalls negativ.

3.7. Zusammenschaltung von Zweipolen

3.7.1. Schaltungen elektrischer Widerstände

3.7.1.1. Reihenschaltung von Widerständen

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist die Stromstärke in allen Widerständen gleich groß.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3.20)$$

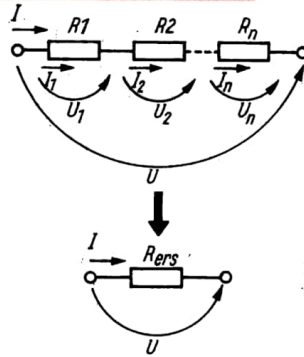


Bild 3.33
Ersatzschaltplan einer Reihenschaltung
von Widerständen

Nach dem Maschensatz Gl. (3.18) gilt

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (3.21)$$

Eigenschaft
Spannungsteilung

$$\text{Aus } U = \sum_{k=1}^n U_k, \quad I = I_n \text{ und}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

ergibt sich

$$R_{\text{ers}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Ersatzwiderstand

$$R_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n R_k \quad (3.22)$$

Der Ersatzwiderstand ist gleich der Summe der Einzelwiderstände. Er ist der wirksame Gesamtwiderstand.

Hinweis

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand immer größer als der größte Einzelwiderstand.

Ersatzwiderstand
der Reihenschaltung
n gleicher Wider-
stände

Spannungsteiler-
gesetz

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (3.13) des Widerstandes gilt:

Die Vergrößerung des Widerstandes bei einer Reihenschaltung ist mit der Vergrößerung der wirksamen Länge des Leiters vergleichbar.

$$R_{\text{ers}} = n R_n$$

Nach den Gln. (3.20), (3.21), (3.22) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{oder} \quad \frac{U_1}{U_n} = \frac{R_1}{R_n} \quad (3.23)$$

$$(3.24)$$

Bei einer Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die dazugehörigen Teilwiderstände.

Technische
Anwendung
Unbelasteter
Spannungsteiler

Eine Reihenschaltung mehrerer Widerstände ist ein Spannungsteiler (Bild 3.34).

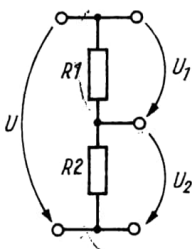


Bild 3.34
Unbelasteter Spannungsteiler

Besonders in der Informationselektrotechnik und in der Meßtechnik werden Spannungsteiler mit veränderbaren Widerständen (Potentiometer) benötigt, um eine vorhandene Klemmenspannung U aufzuteilen (Bild 3.35).

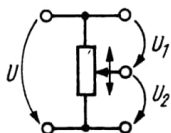


Bild 3.35
Unbelasteter Spannungsteiler mit veränderlichem Abgriff

Da über den Anschluß zwischen R1 und R2 bzw. über den Abgriff kein Strom fließt, wird diese Schaltung als unbelasteter Spannungsteiler bezeichnet. Unter der Bedingung eines unbelasteten Spannungsteilers gilt

$$U_1 = U \frac{R_1}{R} ; \quad U_2 = U \frac{R_2}{R} \quad (3.25 a)$$

$$(3.25 b)$$

Meßbereichs- erweiterung von Spannungsmessern

Läßt man bei Spannungsmessern durch das Vorschalten eines Vorwiderstandes R_V nur einen bestimmten Teil der zu messenden Spannung U'_M auf das Instrument wirken, können größere Spannungswerte gemessen werden (Bild 3.36).

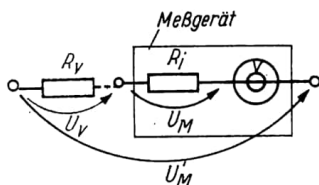


Bild 3.36
Meßbereichserweiterung beim Spannungsmesser

Die Spannung U'_M wird so geteilt, daß nur U_M über dem Innenwiderstand R_i des Meßgeräts abfällt.

$$\text{Erweiterungs-} = \frac{\text{neuer Meßbereich}}{\text{ursprünglicher Meßbereich}} = \frac{U'_M}{U_M}$$

$$n = \frac{U'_M}{U_M} = \frac{R_V + R_i}{R_i}$$

$$n = \frac{R_V}{R_i} + 1 \quad (3.26)$$

Bei n -facher Meßbereichserweiterung errechnet sich R_V zu

$$R_V = R_i(n - 1). \quad (3.26a)$$

3.7.1.2. Parallelschaltung von Widerständen

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen liegt über jedem Widerstand die gleiche Spannung.

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3.27)$$

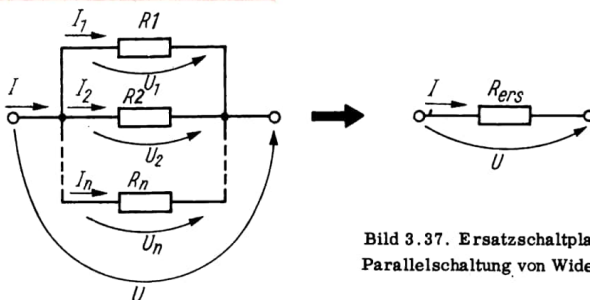


Bild 3.37. Ersatzschaltplan einer Parallelschaltung von Widerständen

Eigenschaft
Stromteilung

Für die Summe der Teilströme gilt nach dem Knotenpunktsatz [Gl. (3.18)]

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (3.28)$$

$$\text{Aus } U = U_n; \quad I = \sum_{k=1}^n I_k \quad \text{und}$$

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{oder} \quad G = \frac{I}{U}$$

ergibt sich

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}; \quad G_{\text{ers}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

Ersatzwiderstand
und
Ersatzleitwert

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (3.29)$$

$$G_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n G_k \quad (3.30)$$

Der reziproke Wert des Ersatzwiderstandes ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

Hinweis

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand immer kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (3.13) des Widerstandes gilt:

Die Verkleinerung des Widerstandes bei einer Parallelschaltung ist mit der Vergrößerung des wirksamen Querschnitts des Leiters vergleichbar.

Parallelschaltungen von Widerständen lassen sich übersichtlich mit Leitwerten berechnen.

Ersatzwiderstand
und Ersatzleitwert
n gleicher Widerstände

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{n}{R_n}; \quad G_{\text{ers}} = n G_n$$

$$R_{\text{ers}} = \frac{R}{n} \quad (3.31)$$

Ersatzwiderstand
zweier
Widerstände

$$R_{\text{ers}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.32)$$

Stromteilergesetz

Nach den Gl'n. (3.27), (3.28), (3.29) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{oder} \quad \frac{I_1}{I} = \frac{R_{\text{ers}}}{R_1} \quad (3.33 a)$$

$$(3.33 b)$$

Mit $R = \frac{1}{G}$ [Gl. (3.10)] gilt

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} \quad \text{oder} \quad \frac{I_1}{I} = \frac{G_1}{G_{\text{ers}}} \quad (3.34 a)$$

$$(3.34 b)$$

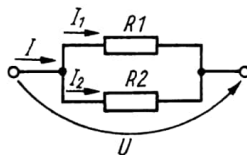


Bild 3.38
Zum Stromteilergesetz

In einer Parallelschaltung verhalten sich die Teilstromstärken wie die Teilleitwerte.

Die Teilstromstärken verhalten sich also umgekehrt wie die Teilwiderstände.

Tafel 3.12. Vergleichende Betrachtung zu den Größen und Gesetzen

Reihenschaltung	Parallelschaltung	Bemerkungen
Stromstärke I $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	Spannung U $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$	gleichbleibende Größen
Spannung U $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $U = \sum_{k=1}^n U_k$	Stromstärke I $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ $I = \sum_{k=1}^n I_k$	
Maschensatz $\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m U_l$	Knotenpunktsatz $\sum_{k=1}^n I_k = \sum_{l=1}^m I_l$	Kirchhoffsche Gesetze
Widerstand R $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ $R = \sum_{k=1}^n R_k$	Leitwert G $G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$ $G = \sum_{k=1}^n G_k$	Widerstands- und
Leitwert G $\frac{1}{G} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}$ $\frac{1}{G} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{G_k}$	Widerstand R $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ $\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$	Leitwertbeziehungen
Spannungsteilergesetz $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$	Stromteilergesetz $\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2}$	Teilungsgesetze

Technische
Anwendung
Meßbereichs-
erweiterung von
Strommessern

Wird durch einen Parallelwiderstand (Shunt) R_p die zu messende Stromstärke I_M so geteilt, daß nur der Teilstrom I_M durch das Meßgerät mit seinem Innenwiderstand R_i fließt, können größere Stromstärken gemessen werden (Bild 3.39).

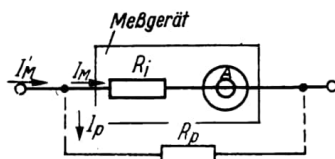


Bild 3.39
Meßbereichserweiterung beim
Strommesser

$$\text{Erweiterungs-} = \frac{\text{neuer Me\ssbereich}}{\text{urspr\"unglicher Me\ssbereich}} = \frac{I'_M}{I_M}$$

$$\text{faktor } n = \frac{I'_M}{I_M} = \frac{R_p + R_i}{R_p}$$

$$n = \frac{I'_M}{I_M} = \frac{R_p + R_i}{R_p}$$

$$n = 1 + \frac{R_i}{R_p} \quad (3.35)$$

Bei n-facher Me\ssbereichserweiterung berechnet sich R_p zu

$$R_p = \frac{R_i}{n - 1} \quad (3.36)$$

3.7.1.3. Gemischte Schaltung von Widerst\u00e4nden

Gemischte Schaltungen, ein Beispiel zeigt Bild 3.40, sind besonders f\u00fcr elektronische Schaltungen typisch.

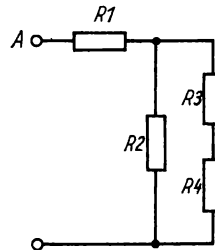
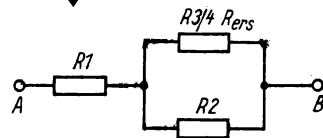
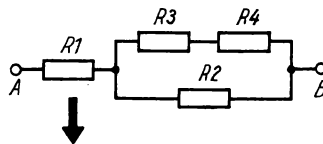


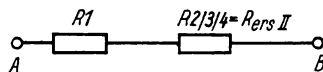
Bild 3.40.
Beispiel einer Gemischtschaltung
von Widerst\u00e4nden

Berechnung

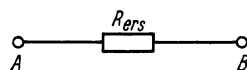
Nur schrittweise m\u00f6glich:



$$R_{ersI} = R3 + R4$$



$$R_{ersII} = R2 \parallel (R3 + R4)$$



$$R_{ers} = R1 + R2 \parallel (R3 + R4)$$

Bild 3.41.
Zur Berechnung von Gemischtschaltungen

1. Umzeichnen der Schaltung, damit Zweige und Knotenpunkte erkennbar sind,
2. Erkennen und Kennzeichnen der Reihen- bzw. Parallelschaltungen innerhalb der Gemischtschaltung,
3. Berechnen der Ersatzwiderst\u00e4nde von Reithenschaltungen,
4. Berechnen der Ersatzwiderst\u00e4nde von Parallelschaltungen,
5. Berechnen der Reihen- bzw. Parallelschaltungen erfolgt so lange, bis der Ersatzwiderstand der gesamten Schaltung ermittelt ist.

Hinweis

Für die Berechnung der Spannungen und Stromstärken ist sinngemäß das gleiche Prinzip anzuwenden.

Technische
Anwendung
Belasteter
Spannungsteiler

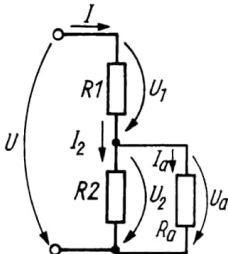


Bild 3.42. Belasteter Spannungsteiler

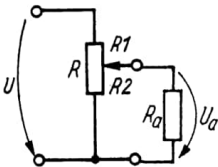


Bild 3.43. Belasteter Spannungsteiler mit veränderlichem Abgriff

Wie in den Bildern 3.42 und 3.43 angegeben, ist parallel zum Teilwiderstand R_2 ein Belastungswiderstand R_a geschaltet. Der Strom I verzweigt sich dadurch in die Teilströme I_2 und I_a .

Für die Spannung U_a am Belastungswiderstand gilt

$$U_a = U \frac{R_2 R_a}{R_1 R_2 + R_1 R_a + R_2 R_a}$$

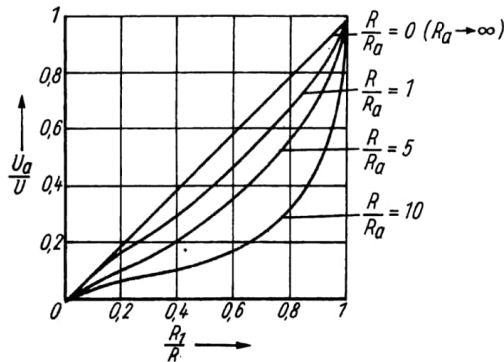


Bild 3.44. Kennlinien des belasteten Spannungsteilers

oder mit $R_1 = R - R_2$

$$U_a = U \frac{R_2 R_a}{R R_2 + R R_a - R_2^2} \quad (3.37)$$

Im Bild 3.44 sind für verschiedene Belastungswerte die Spannungsverhältnisse $\frac{U_a}{U}$ dargestellt.

Eine annähernd lineare Spannungsteilung des belasteten Spannungsteilers ist bis zu einem Verhältnis $\frac{R}{R_a} \approx 5$ möglich.

3.7.2. Zusammenschaltung elektrischer Spannungsquellen

3.7.2.1. Reihenschaltung von Spannungsquellen

Berechnung

Nach den Gln. (3.19) und (3.22) gilt

$$E_{\text{ers}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

Ersatzurspannung

$$E_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n E_k \quad (3.38)$$

$$R_{\text{iers}} = R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}$$

Ersatz-
innenwiderstand

$$R_{\text{iers}} = \sum_{k=1}^n R_{ik} \quad (3.39)$$

Bei einer Reihenschaltung von Spannungsquellen ist die Gesamturspannung E_{ers} gleich der Summe der vorzeichenbehafteten Urspannungen und der Ersatzinnenwiderstand R_{iers} gleich der Summe der Innenwiderstände.

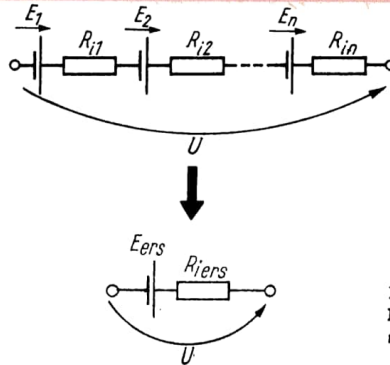


Bild 3.45
Ersatzschaltplan einer Reihenschaltung von Spannungsquellen

Ersatzurspannung
n gleicher
Spannungsquellen

$$E_{\text{ers}} = n E \quad (3.40)$$

Ersatzinnenwider-
stand n gleicher
Innenwiderstände

$$R_{\text{iers}} = n R_i \quad (3.41)$$

Hinweis

Bei einer Reihenschaltung müssen die einzelnen Spannungsquellen nicht die gleiche Urspannung aufweisen.

Technische
Anwendung

Reihenschaltungen von Spannungsquellen werden dort vorgenommen, wo eine höhere Spannung, als sie eine einzelne Quelle liefert, benötigt wird (z.B. Reihenschaltung von Batterien aus elektrochemischen Elementen in Taschenlampen, Kofferradios, Kraftfahrzeugen u.a.). Es ist zu beachten, daß die Spannungsquellen etwa die gleiche Strombelastbarkeit haben. Anderenfalls werden die Quellen entweder überlastet oder nicht ausgenutzt.

3.7.2.2. Parallelschaltung von Spannungsquellen

Berechnung

Nach Gl. (3.27) gilt

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n \quad (3.42)$$

Die Urspannungen aller Spannungsquellen müssen in Betrag und Richtung übereinstimmen.

Bei Nichtbeachtung dieser Forderung fließen z. T. hohe Ausgleichsströme, ohne daß ein Außenwiderstand angeschlossen ist. Dies führt zur Erwärmung und Zerstörung der Spannungsquellen.

Wird die Forderung erfüllt, gilt für die Stromverteilung auf die einzelnen Spannungsquellen nach Gl. (3.33 a)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{i2}}{R_{i1}} \quad (3.43)$$

Bei einer Parallelschaltung von Spannungsquellen verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die Innenwiderstände der Spannungsquellen (gilt jedoch nicht immer für Generatoren).

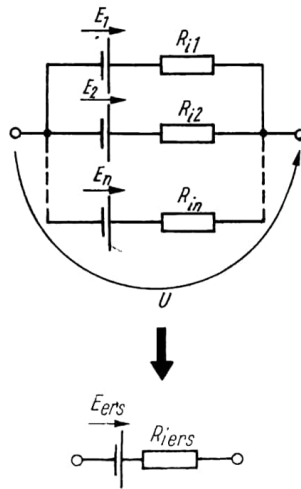


Bild 3.46
Ersatzschaltplan einer Parallelschaltung von Spannungsquellen

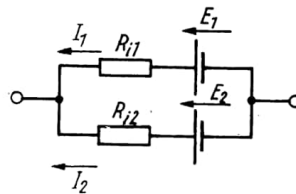


Bild 3.47
Zur Stromverteilung auf die Spannungsquellen

Technische
Anwendung

Die Parallelschaltung von Spannungsquellen wird ausschließlich dann angewendet, wenn die Belastbarkeit einer einzelnen Quelle nicht ausreicht, um den Lastbedarf zu decken (z.B. Parallelschaltung von Batterien aus elektrochemischen Elementen, Gleichstromgeneratoren im Pufferbetrieb).

3.8. Elektrische Energie und Leistung

3.8.1. Elektrische Energie

3.8.1.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten

Elektrische Energie

Ist die im elektrischen Feld vorhandene Energie. Sie tritt in potentieller und in kinetischer Form auf. Sie ist stets an elektrische Ladungen gebunden.

Potentielle
elektrische Energie
(gespeicherte
Elektroenergie)

Die elektrischen Ladungen sind im Ruhezustand, es findet keine Energiewandlung statt; die elektrische Energie ist das Arbeitsvermögen. In potentieller Form befindet sich die elektrische Energie z.B. in

- allen Spannungsquellen im Leerlauf ($R_a = \infty$),
- geladenen Kondensatoren (vgl. Abschn. 4.4.).

Kinetische
elektrische Energie
(Energie-
umwandlung)

Die elektrischen Ladungen sind in Bewegung, es findet eine Energieumwandlung statt. Je nach dem vorliegenden Umwandlungsprozeß nimmt der Betrag der elektrischen Energie ab oder wird ständig erneuert und aufrechterhalten.

Elektrische Arbeit

Umwandlung kinetischer elektrischer Energie in andere Energieformen.

Beim Durchfluß einer Ladungsmenge ΔQ durch einen passiven Zweipol AB wird in diesem eine Energie ΔW umgesetzt [vgl. Abschnitt 3.3.2.1., Gl. (3.3 b)].

Formelzeichen

W

Physikalischer
Zusammenhang

$$\Delta W = \Delta Q U_{AB}$$

(3.3 c)

Mit Gl. (3.1) ergibt sich

$$\Delta W = U I \Delta t. \quad (3.44)$$

Sind Spannung U und Stromstärke I von der Zeit unabhängig, gilt

$$W = U I t. \quad (3.45)$$

Mit $I = \frac{U}{R}$ und $U = I R$ wird

$$W = \frac{U^2}{R} t \quad \text{oder} \quad W = I^2 R t \quad (3.45 a)$$

$$(3.45 b)$$

Einheit

Joule

$$[W] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J (Joule)}$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ Wattstunde} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ Kilowattstunde} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s}$$

(James Watt, 1736–1819, englischer Ingenieur)

Grundmeßschaltung

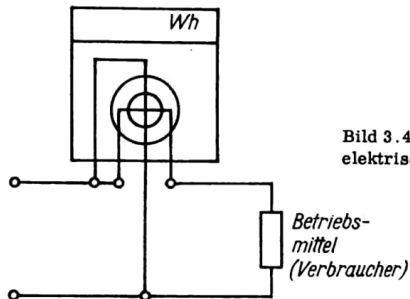


Bild 3.48. Grundschaltung für die Messung der elektrischen Arbeit

Joule

Ein Joule ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt der Kraft 1 N in Richtung der Kraft um 1 m verschiebt.

(James Joule, 1818–1889, englischer Physiker;

Isaac Newton, 1643–1727, englischer Mathematiker und Naturwissenschaftler)

- Vorteile der elektrischen Energie
- Leichter und verlustarmer Transport über große Entfernungen.
 - Wirtschaftliche und technisch gut zu realisierende Umwandlung in andere Energiearten.
 - Leichte Beeinflussbarkeit der Energiemengen.

3.8.1.2. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen und umgekehrte Energiewandlungen

Umwandlung elektrischer Energie in thermische Energie

Die elektrotechnische Wärmeerzeugung beruht auf der Umwandlung der kinetischen Energie von Ladungsträgern in Wärmeenergie. Das Energiewandlerelement von elektrischer in gewünschte oder unerwünschte Wärmeenergie ist der Widerstand. Der elektrische Widerstand eines Leiters ist die Bedingung, und der elektrische Strom ist die Ursache für die Wirkung Stromwärme. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie (vgl. Abschn. 1.3.) ist die in einem elektrischen Widerstand umgesetzte elektrische Energie W_{el} gleich der erzeugten thermischen Energie W_{th} .

$$W_{el} = W_{th}$$

Mit Gl. (3.45 b) ergibt sich

Joulesches Gesetz

$$W_{th} = I^2 R t. \quad (3.46)$$

Technische Anwendung der Stromwärme

Tafel 3.13 enthält die verschiedenen Möglichkeiten.

Tafel 3.13. Möglichkeiten der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie

Ladungsträger	Elektronen in metallischen und Masseleitern	Elektronen und Ionen beim Übergang vom Vakuum in feste Leiter	Ionen und Elektronen in Gasen	Ionen und Elektronen in Flüssigkeiten
Anwendung	Widerstandserwärmung	Elektronenstrahl-erwärmung	Lichtbogen-erwärmung	elektrolytische Erwärmung

Widerstandserwärmung

Elektrisches Widerstandsschweißen

Preßschweißen unter Druck, bei dem elektrischer Strom an den Stoßstellen der Werkstücke infolge eines hohen Übergangswiderstandes eine schnelle Erwärmung bewirkt, die z. T. den Schmelzpunkt des Werkstoffs erreicht (Bild 3.49).

Technische Wärmegeräte

Wärmequelle ist meist ein stromdurchflossener Widerstandsdraht (Heizleiter) mit einem hohen spezifischen Widerstand und einer hohen Gebrauchstemperatur. Besonders eignen sich Drähte und Stäbe aus

- Legierungen mit Eisen, Nickel, Chrom, Aluminium,
- Siliziumkarbid,
- Molybdändisilizid.

Beispiele:

Raumheizer, Kochgeräte, Wärmestrahlungsgeräte für Heiz-, Koch-, Back-, Trockenprozesse.

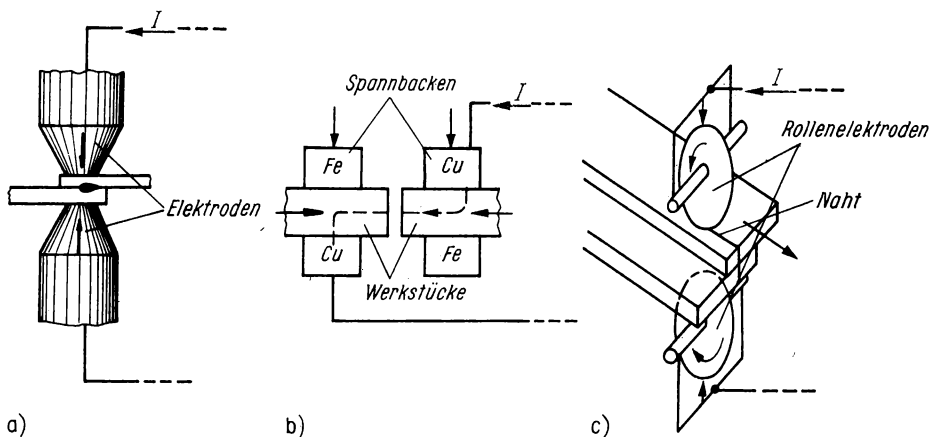


Bild 3.49. Schematische Darstellung elektrischer Widerstandsschweißverfahren
a) Punktschweißen; b) Abbrenn-Stumpfschweißen; c) Nahtschweißen

Schmelzsicherungen

Aufgaben und Wirkungsweise

Allgemeines Schaltzeichen

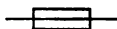


Bild 3.50.

In elektrotechnischen Anlagen müssen lang andauernde Überströme und kurzzeitig fließende Kurzschlußströme mit Sicherheit unterbunden werden. Zu diesem Zweck werden insbesondere Schmelzsicherungen eingesetzt. Ihre Wirkungsweise beruht auf einer zeitlich andauernden Wärmeentwicklung, die einen Schmelzdraht definierter Strombelastbarkeit zum Durchschmelzen bringt (vgl. Bild 3.51).

Schmelzsicherungen dienen dem Schutz

- von Leitungen und Betriebsmitteln vor unzulässiger Erwärmung
- von Energieversorgungseinrichtungen (z.B. Transformatoren, Generatoren) vor Kurzschlüssen mit Folgeschäden.

Nach dem Aufbau werden unterschieden

- Patronenschmelzsicherungen (z.B. im Haushalt, zur Niederspannungsverteilung)
- Gerätefeinsicherungen (z.B. in elektronischen Geräten).

Aufbau

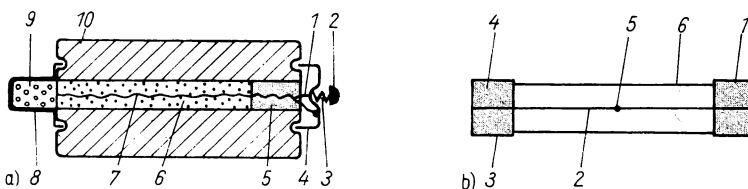


Bild 3.51. Grundsätzlicher Aufbau von

a) Patronenschmelzsicherungen

- 1 Kennmelderdraht; 2 Kennmelder; 3 Feder; 4 Kontaktfläche; 5 Asbest; 6 Löschsand; 7 Schmelzdraht; 8 Kontaktfläche; 9 Zement; 10 Porzellankörper (Patrone)

b) Gerätefeinsicherungen

- 1 Kontaktfläche; 2 Schmelzdraht; 3 Kontaktfläche; 4 Prägung Strom/Spannung; 5 Schweiß- oder Lötverbindung; 6 Glaszylinder

Abschmelz- charakteristik

Nach der Abschmelzdauer unterscheidet man

- flinke Sicherungen (vor allem für den Kurzschlußschutz)
- träge Sicherungen (besonders dort, wo Überströme für eine gewisse Zeit möglich und zulässig sind).

Tafel 3.14. Abhängigkeit der Abschmelzzeit von der die Sicherung durchfließenden Stromstärke

Nennstrom und Art der Sicherung	Abschmelzzeit s			
	10 A	25 A	30 A	40 A
10 A flink	∞	0,3 ... 8,5	0,12 ... 2,2	0,04 ... 0,55
10 A träge	∞	16 ... 120	3,5 ... 23	0,9 ... 3,6

In Tafel 3.15 sind wichtige Kenndaten und Unterscheidungsmerkmale von Patronenschmelzsicherungen zusammengestellt.

Standardisierung

Tafel 3.15. Patronenschmelzsicherungen

Nennstrom	Kennmelderfarbe und Paßringfarbe	Gewinde des Sicherungselements
(2)	Rosa	Edisongewinde 16
(4)	Braun	E 16
(6)	Grün	E 16 und E 27
10	Rot	E 16 und E 27
16 (15)	Grau	E 16 und E 27
20	Blau	E 16 und E 27
25	Gelb	E 16 und E 27
36 (35)	Schwarz	E 27 und E 33
50	Weiß	E 33
63 (60)	Kupferfarbe	E 33
80	Silber	Rohrgewinde $\frac{1}{4}$ " (Zoll)
100	Rot	R $\frac{1}{4}$ "
125	Gelb	R 2"
160	Kupferfarbe	R 2"
200	Blau	R 2"

Arbeits- und Brandschutz

- Sicherungen sind nur von dazu berechtigten Personen zu installieren.
- Bei Reparaturen an elektrischen Anlagen ist durch Entfernen der Sicherungen Spannungsfreiheit herzustellen. Ein Wiedereinschrauben während der Reparatur darf nicht möglich sein.
- Defekte Sicherungen dürfen nicht repariert werden!
- Das Austauschen von Paßringen kleinerer Nennstromstärke gegen solche für höhere Nennströme ist nur Befugten gestattet!

Bimetallschalter

Der Bimetallstreifen biegt sich wegen der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Metalle bei Temperaturerhöhung und öffnet oder schließt damit einen Kontakt. Durch einen Dauermagneten oder durch vorgespannte Federn wird ein schlagartiges Schalten erreicht.

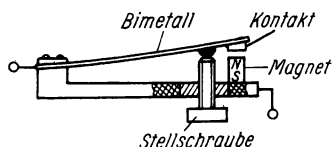


Bild 3.52
Bimetallschalter

Bimetallschalter werden als Überstromauslöser oder als Reglerschalter (Bild 3.52) verwendet.

Elektronenstrahl- erwärmung

Im Vakuum beschleunigte Elektronen haben eine hohe kinetische Energie. Diese geben sie beim Aufprall auf feste Stoffe vollständig ab. Durch Bündeln des Elektronenstrahls wird eine örtliche hohe Erwärmung des zu bearbeitenden Werkstoffs erreicht.

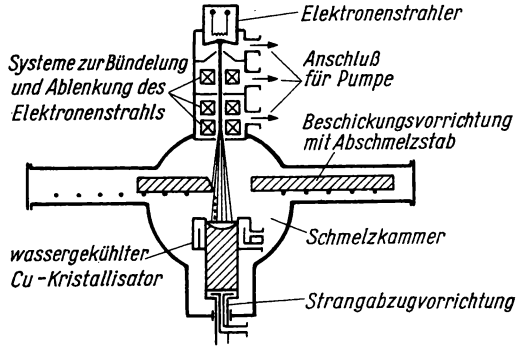


Bild 3.53
Elektronenstrahl-
ofen

Technisch angewendet wird die Elektronenstrahlerwärmung zur Herstellung von feinen Bohrungen (mit wenigen Mikrometern Durchmesser), zum Schmelzen von Vakuumstählen höchster Reinheit im Elektronenstrahl-Ofen (Bild 3.53) und zum Auslösen chemischer Reaktionen.

Lichtbogen- erwärmung

Bei Spannungen von etwa 40 ... 50 V erwärmt sich die Berührungsstelle der Elektroden sehr stark. Beim Auseinanderziehen treten aus der Katode Elektronen aus, die sich mit hoher Geschwindigkeit zur Anode bewegen. Die Luftstrecke wird durch Stoßionisation leitend (Strombegrenzung notwendig). Treffen die Elektronen auf die Anode, dann wird ihre kinetische Energie in Wärme umgesetzt.

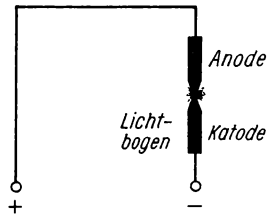


Bild 3.54
Prinzipische Skizze der Lichtbogenscheinung

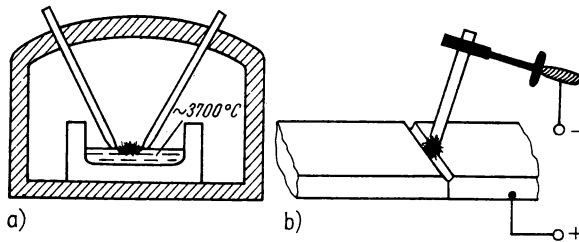


Bild 3.55. Technische Anwendung der Lichtbogenerwärmung
a) Lichtbogen-Ofen; b) Lichtbogenschweißen (nach Slawjanow)

Elektrolytische
Erwärmung

Das Erwärmungsprinzip entspricht dem der metallischen Leiter, nur daß die Ionen den Hauptteil der Erwärmung tragen.
Angewendet wird das Prinzip z.B. beim elektroerosiven Trennen und Bohren sehr harter Metalle und beim Flüssighalten von Schmelzflüssen (Aluminiumherstellung).

Unerwünschte
elektrische
Wärmeentwicklung

Da jeder Stromfluß mit einer Erwärmung des Leiters verbunden ist, können auch unerwünschte Wärmeerscheinungen auftreten (z.B. in Leitungen, Bauelementen, Klemmstellen).
Die entstehende Wärme ist Verlustwärme und durch Kühlung oder andere Maßnahmen niedrig zu halten.

Unerwünschte
Lichtbogen-
erscheinungen

Schaltlichtbögen können Abbrand und Festschweißen der Schaltkontakte bewirken. Die damit verbundene erhöhte Brand- und Unfallgefahr verlangt entsprechende Maßnahmen:

- Schnellschalten,
- Funkenunterdrückung,
- Lichtbogenlöschung.

Umwandlung
thermischer Energie
in elektrische
Energie

Für die thermische Spannungserzeugung hat der Seebeck-Effekt die größte Bedeutung. (Thomas Johann Seebeck, 1770-1831, deutscher Naturforscher)

Die Unterschiede der Dichte und der Beweglichkeiten freier Elektronen verschiedener Leiter oder Halbleiter führen bei Berührung (z.B. Verlöten, Verschweißen) dieser Stoffe zu einer temperaturabhängigen Ursprungsspannung E_{th} (Thermospannung) (Bild 3.56).

$$E_{th} \sim (T_1 - T_2).$$

Die Thermospannung hängt neben der Temperaturdifferenz von der Kombination der Leitermaterialien ab. Sie beträgt nur wenige mV/100 K.

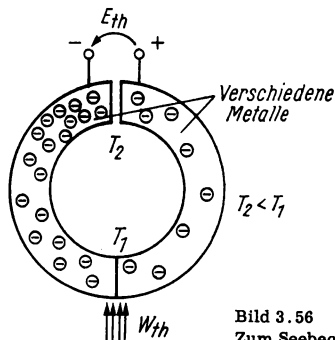


Bild 3.56
Zum Seebeck-Effekt

Technische
Anwendung

Der Seebeck-Effekt wird technisch im Thermoelement angewendet. Thermoelemente benutzt man zur Temperaturmessung. Die Prinzipschaltung zeigt Bild 3.57.

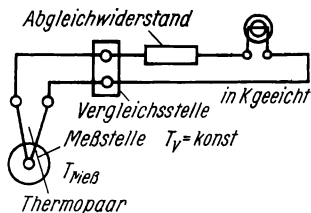


Bild 3.57
Prinzipschaltplan einer Thermoelement-Meßanlage

Hat die Meßstelle eine andere Temperatur als die Vergleichsstelle (konstante Bezugstemperatur), so entsteht eine Thermospannung, die von einem in Wärmeeinheiten geeichten Meßinstrument gemessen wird.

Umwandlung elektrischer Energie in elektromagnetische Energie und umgekehrt

Dient hauptsächlich als Zwischenstufe der Umwandlung von Elektroenergie in mechanische Energie. Die Umwandlung erfolgt unter Ausnutzung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes in Elektromotoren und Elektromagneten.

Diese Energieumwandlung ist umkehrbar. Hierzu werden meistens Generatoren benutzt, die z.B. von Dampf- oder Wasserturbinen angetrieben werden.

Hinweis

Vgl. hierzu Abschn. 5.

Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie
Elektrochemische Vorgänge

Wäßrige Lösungen von Säuren, Basen und Salzen haben die Eigenschaft, den elektrischen Strom zu leiten. Diese Fähigkeit beruht auf der elektrolytischen Dissoziation der Stoffe. Die Moleküle gehen in einem bestimmten Umfang (Dissoziationsgrad) als Ionen in Lösung. Unter dem Einfluß einer Spannung wandern positive Ionen zur Katode (Kationen) und die negativen zur Anode (Anionen). Sie nehmen dort Elektronen auf bzw. geben sie ab und werden selbst als elektrisch neutrale Stoffe abgeschieden. Diesen Vorgang nennt man **Elektrolyse** (Bild 3.58).

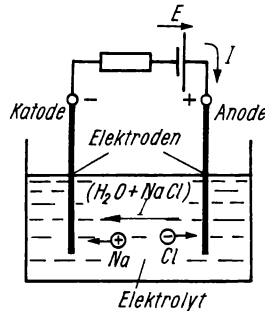


Bild 3.58
Ionenbewegung im Elektrolyten

Es ist aber auch möglich, daß Sekundärreaktionen mit der Elektrode oder dem Elektrolyten eintreten.

Stofftransport

Der Stromfluß im Elektrolyten ist mit einem Stofftransport verbunden. Die abgeschiedene Masse der Stoffe ist dabei der transportierten Ladungsmenge Q proportional, und es gilt allgemein

1. Faradaysches Gesetz

$$m = c Q = c I t; \quad (3.47)$$

c elektrochemisches Äquivalent.

Zur elektrochemischen Umsetzung von 1 Grammäquivalent Stoff sind stets 96 500 As erforderlich.

$$\text{Grammäquivalent} = \frac{\text{relative Atommasse in g}}{\text{Wertigkeit}}$$

2. Faradaysches Gesetz

$$m = \frac{1}{96\,500 \text{ A} \cdot \text{s}} \ddot{A} I t; \quad (3.48)$$

m Masse des abgeschiedenen Stoffes in g,
 \ddot{A} Grammäquivalent in g,
 I Stromstärke in A,
 t Zeitdauer des Stromflusses in s.

Technische
Anwendung

- Elektrolytische Metallgewinnung (vor allem Reinstmetalle)
- Elektrolytisches Verchromen, Vernickeln, Vergolden u. a.
- Galvanoplastik (Klischeeherstellung)

Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie

Sie beruht auf der Ladungstrennung an den Grenzflächen Metall/Elektrolyt durch eine nichtelektrische Kraft (Lösungsdruck, osmotischer Druck).

Wechselwirkung zwischen Elektrode und Elektrolyt

An der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt versucht das Metall in Ionenform in Lösung zu gehen (Lösungsdruck), und der Elektrolyt ist bestrebt, Metallionen an die Elektrode abzugeben (osmotischer Druck). Überwiegt der Lösungsdruck, so wird die Elektrode negativ, überwiegt der osmotische Druck, wird sie positiv gegenüber dem Elektrolyten aufgeladen. Folge dieses chemischen Vorgangs ist eine elektrische Urspannung zwischen Elektrolyt und Elektrode.

Elektrochemische Spannungsreihe

Ordnet man chemische Elemente in einer Reihe nach ihrer Spannung gegenüber einer definierten Lösung des jeweiligen Salzes, wobei als Gegenelektrode eine Wasserstoffelektrode benutzt wird, erhält man die sog. elektrochemische Spannungsreihe (nachfolgend ist eine Auswahl wichtiger Elemente angeführt):

(edel)		(Bezugswert)		(unedel)									
Au	Pt	Hg	Ag	Cu	H	Pb	Sn	Ni	Fe	Cr	Zn	Al	K

Technische
Anwendung

Werden zwei Elektroden aus unterschiedlichem Metall oder aus Graphit und einem Metall in einen Elektrolyten getaucht, so entsteht auf Grund des verschiedenen Lösungsdrucks der Metalle zwischen beiden eine Urspannung.

Primärelemente (galvanische Elemente)

Spannungsquellen, in denen durch chemische Vorgänge elektrische Urspannungen entstehen.

Beispiel:

Taucht man einen Kupferstab und einen Zinkstab in verdünnte Schwefelsäure, so hat das Zink den höheren Lösungsdruck. Es wird gegenüber dem Kupfer negativ. Dieses Element wurde etwa 1800 von Volta gebaut (Bild 3.59). Das technisch bedeutendste Primärelement ist das Kohle-Zink-Element.

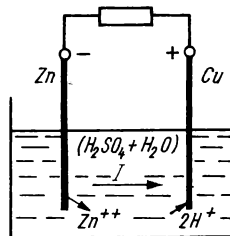


Bild 3.59
Volta-Element

Sekundärelemente
(Akkumulatoren oder
Sammler)

Sie können erst nach dem Aufladen eine elektrische Ursprungspannung bilden. Beim Aufladen wird die dem Akkumulator zugeführte elektrische Energie in chemische umgewandelt und gespeichert. Während der Entladung wird die chemische Energie wieder in elektrische umgesetzt.

Bleiakkumulator

In ihm ist die negative Elektrode Blei, die positive Elektrode Blei-IV-Oxid und der Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure. Die Zellenspannung beträgt 2 V.

Entladevorgang

Bei der Entladung wird die negative Elektrode (Pb) zu Bleisulfat (PbSO_4) umgebildet, der frei werdende Wasserstoff wandert zur positiven Elektrode (PbO_2) und bildet hier in Verbindung mit der Schwefelsäure Bleisulfat und Wasser.

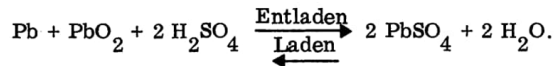
Der Entladevorgang ist also gekennzeichnet durch das Entstehen von Wasser (Säuredichteverringung).

Die Säuredichte ist ein Maß für den Ladungszustand der Zelle.

Ladevorgang

Die Reaktionen werden wieder rückgängig gemacht.

Die Gleichung für die Gesamtreaktion lautet



Bilder 3.60 und 3.61 zeigen den Spannungsverlauf an den Klemmen beim Laden und Entladen.

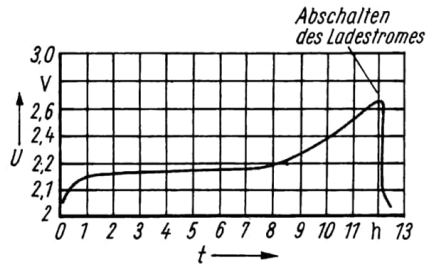
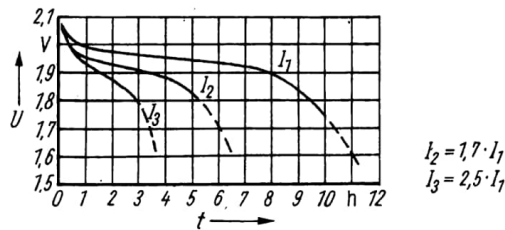


Bild 3.60
Spannungsverlauf beim Laden



$$I_2 = 1,7 \cdot I_1$$

$$I_3 = 2,5 \cdot I_1$$

Bild 3.61. Spannungsverlauf beim Entladen

Der Bleiakkumulator gilt als entladen, wenn die Zellenspannung 1,83 V erreicht hat. Der Ladevorgang ist bei 2,7 V beendet.

Neben Bleiakkumulatoren sind Nickel-Eisen-Sammler und Nickel-Kadmium-Akkumulatoren die technisch bedeutendsten.

Speichervorgänge
elektrischer Energie

Das Speichervermögen von Akkumulatoren ist je nach Bauart und Größe verschieden. Diejenige Ladungsmenge, die ein geladener Akkumulator wieder abgeben kann, wenn er bis zur unteren zulässigen Zellenspannung entladen wird, bezeichnet man als Kapazität.

Kapazität eines
Akkumulators

Die Kapazität eines Akkumulators ist das Produkt aus Entladestromstärke und Entladedauer.

Einheit

Amperestunde ($A \cdot h$)

Hinweis

Der Begriff „Kapazität“ ist auch ein Maß für die Speicherkapazität elektrischer Ladungen eines Kondensators (vgl. Abschn. 4.4.1.).

Unerwünschte elektrochemische Vorgänge

Die volkswirtschaftlich verlustbringendste Erscheinung ist die elektrochemische Korrosion von Eisen.

Elektrochemische Korrosion

Ist die von der Oberfläche ausgehende unerwünschte Zerstörung von Werkstoffen (Metallen) durch elektrochemische Reaktion mit ihrer Umgebung.

Die elektrochemische Korrosion wird durch galvanische Elementbildung (Korrosionselement) oder durch Elektrolyse ausgelöst, wobei elektrische Energie in chemische und sekundär in Wärme umgewandelt wird.

Hinweis

Vgl. „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

Umwandlung elektrischer Energie in Lichtenergie

Licht ist elektromagnetische Strahlung, die einen bestimmten Bereich des elektromagnetischen Spektrums einnimmt und vom menschlichen Auge wahrgenommen sowie nach Helligkeit und Farbe bewertet wird.

Durch Energieaufnahme können Atome, Moleküle oder Ionen Lichtenergie aussenden.

Technische Anwendung

Nach der Art der Energieumsetzung unterscheidet man

- Temperaturstrahler,
- Lumineszenzstrahler.

Temperaturstrahler (Glühlampen)

In einem evakuierten Glaskolben wird ein Draht durch die Stromwärme so hoch erhitzt, daß er Licht aussendet. Die Lichtausbeute nimmt dabei mit steigender Temperatur zu. Als Werkstoff mit hoher Temperaturbeständigkeit wird vor allem Wolfram verwendet, das im stark luftverdünnten Raum bei Dauerbetrieb bis 2300 °C erhitzt werden kann, ohne schnell zu verdampfen. Durch bestimmte Füllungen (Edelgas, Jod) wird die Lebensdauer bzw. die Belastbarkeit der Lampe wesentlich erhöht.

Einfache oder doppelte Wendelung (Bild 3.62) verringert die Wärmeabgabe und erhöht die Lichtausbeute.

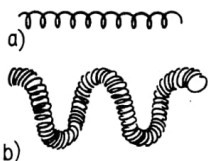


Bild 3.62
Glühlampenleuchtdrähte
a) Einfachwendel; b) Doppelwendel

Lumineszenz-
strahler

Leuchtstoffe oder Gase werden durch Energiezuführung unterschiedlicher Art zur Aussendung elektromagnetischer Strahlung bestimmter Wellenlänge angeregt.
Im Unterschied zu Temperaturstrahlern ist der Anteil der in Wärme umgesetzten elektrischen Energie gering.

Gasentladungs-
strahler
Primärstrahler

Elektronen stoßen mit Gasatomen oder Molekülen, die sich in einem Quarz- oder Glasgefäß befinden, zusammen und regen diese zur Aussendung von Licht an (Primärstrahler).

Sekundärstrahler

Für Beleuchtungszwecke werden die Strahler meist mit Quecksilberdampf gefüllt. Da die Quecksilberstrahlung nicht im sichtbaren Spektralbereich liegt, wird sie durch einen auf die Innenwand des Gefäßes aufgetragenen Leuchtstoff in sichtbares Licht umgewandelt.
Für Sonderzwecke (z.B. Reklamebeleuchtung) werden auch andere Gasfüllungen verwendet, wodurch Licht bestimmter Farbe entsteht (Argon - Grün, Neon - Rot, Helium - Rosa, Natrium - Gelb).
Durch die Erhöhung des Gasdrucks (bei Höchstdrucklampen bis etwa $10 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$) kann die Lichtausbeute wesentlich gesteigert werden. Sie ist bei diesen Lampen wesentlich höher als bei Temperaturstrahlern.

Umwandlung von
Lichtenergie in
elektrische Energie

Lichtenergie kann durch den äußeren und den inneren lichtelektrischen Effekt in elektrische Energie umgewandelt werden. Bauelemente zur Ausnutzung dieser Effekte sind u.a. Fotozelle, Fotoelement und Fotowiderstand.

Technische
Anwendung
Äußerer licht-
elektrischer Effekt

Aus der Oberfläche von Oxiden der Alkalimetalle, z.B. von Kaliumoxid, Zäsium, treten bei Lichteinfall Elektronen aus.

Fotozelle

Sie besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in dem sich eine dünne Schicht eines elektronenaussendenden Metalles - die Fotokatode - befindet.

Eine weitere Elektrode im Glaskolben, die Anode, liegt an einer positiven Spannung gegenüber der Katode. Bei Lichteinfall werden die aus der Katode austretenden Elektronen von der Anode angesaugt, so daß durch den außen angeschlossenen Stromkreis (Bild 3.63) ein Strom fließt, dessen Stärke dem Lichteinfall proportional ist.

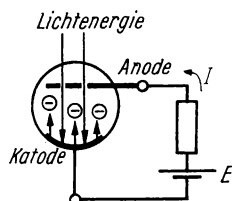


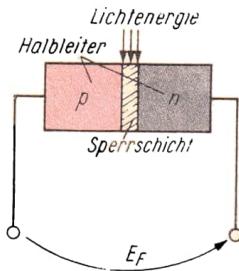
Bild 3.63
Fotozelle

Innerer licht-
elektrischer Effekt

Bei Lichteinwirkung werden in Halbleiterwerkstoffen Ladungsträger freigesetzt.

Fotoelement
(Fotodiode)

An der Berührungsstelle zwischen Halbleitern mit verschiedenem Leitfähigkeitscharakter (p bzw. n) entsteht eine sog. Sperrschicht (Bild 3.64). Bei Lichteinfall werden Ladungsträger durch die Sperr-



schicht getrennt; es entsteht eine Ursprung. Man bezeichnet dies als den Sperrschicht-Fotoeffekt und die Bauelemente als Fotoelemente oder Fotodioden.

Wird an die Klemmen des Fotoelements ein Widerstand angeschlossen, fließt ein Fotostrom.

Die Ursprung E_F des Fotoelements ist von der Stärke und der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig.

Fotoelemente werden in elektrischen Belichtungsmessern oder Sonnenbatterien verwendet.

Bild 3.64 Fotoelement

Fotowiderstand

Material: Halbleiter (meistens Kadmiumverbindungen).

Durch die aufgenommene Lichtenergie wird im Fotowiderstand die Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger größer; der Widerstandswert verkleinert sich.

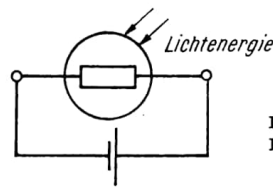


Bild 3.65
Fotowiderstand

3.8.2. Elektrische Leistung

Unabhängig von der spezifischen Energieform gilt

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} .$$

Elektrische Leistung Für die elektrische Leistung ergibt sich mit Gl. (3.45)

Formelzeichen

P

Physikalischer
Zusammenhang

$$P = U I \quad (3.49)$$

oder unter Anwendung der Gln. (3.45 a) und (3.45 b)

$$P = \frac{U^2}{R} ; \quad P = I^2 R . \quad (3.50 a)$$

$$(3.50 b)$$

Einheit

Watt

$$[P] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ MW} = 1 \text{ Megawatt} = 10^6 \text{ W}$$

$$1 \text{ kW} = 1 \text{ Kilowatt} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 1 \text{ Milliwatt} = 10^{-3} \text{ W}$$

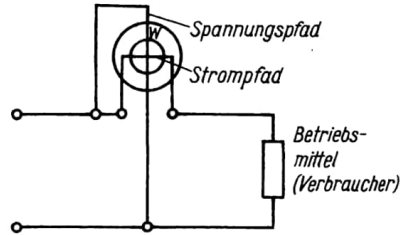


Bild 3.66. Grundschialtung für Leistungsmessung

Tafel 3.16. Größenordnungen der Leistung

Gerät/Bauelement	Leistung W	Gerät/Bauelement	Leistung W
Empfängerröhren	bis 50	Elektrische Haushaltwärmegeräte	$40 \dots 2 \cdot 10^3$
Halbleiterbauelemente	bis 10^3	Motor einer E-Lok	$\approx 750 \cdot 10^3$
Glühlampen	$10^{-1} \dots 10^3$	Generatoren in Kraftwerken	bis 10^9

3.8.3. Wirkungsgrad, Leistungsumsatz und Anpassung

Wirkungsgrad

Bei der Umwandlung elektrischer Energie in Bauelementen, Geräten, Maschinen und Anlagen treten neben der gewünschten Energieform auch unerwünschte auf.

In der Technik werden diese unerwünschten Energieumwandlungen als „Verlust“ bezeichnet.

Das Verhältnis zwischen Nutzenergie (abgegebener Energie) und aufgewandter (zugeführter) Energie ist der Wirkungsgrad.

Meistens werden nicht die Energien, sondern die Leistungen ins Verhältnis gesetzt.

Formelzeichen η

Physikalischer Zusammenhang

$$\eta = \frac{P_N}{P_{zu}}$$

(3.51)

$$P_{zu} = P_N + P_V ;$$

P_{zu} zugeführte Leistung (auch P_i , indizierte Leistung, üblich),

P_N Nutzleistung (auch P_e , effektive Leistung, üblich),

P_V Verlustleistung.

Tafel 3.17. Technische Richtwerte für Größenordnungen des Wirkungsgrades

Einrichtung/Bauelement	Wirkungsgrad %	Einrichtung/Bauelement	Wirkungsgrad %
Glühlampen	3...15	Elektrolok	etwa 85
Dampflok	etwa 20	Transformatoren	etwa 95
Diesellok	etwa 65	St-Gleichrichter	etwa 98

Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie ist in einem geschlossenen System die vorzeichenbehaftete Summe aller Leistungen einschließlich der Verlustleistung P_V gleich Null.

Der Wirkungsgrad kann somit höchstens 1 oder 100 % werden.

Leistungsumsatz in elektrischen Stromkreisen

Leistungsumsatz mit maximalem Wirkungsgrad

Man unterscheidet zwei Arten:

- Leistungsumsatz mit maximalem Wirkungsgrad in der Leistungselektrotechnik,
- Leistungsumsatz mit maximaler Verbraucherleistung in der Informationselektrotechnik.

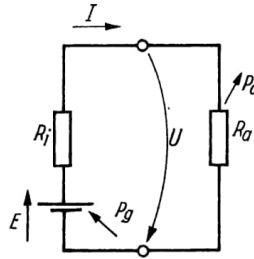


Bild 3.67
Leistungsumsatz im Grundstromkreis
 P_g Leistung der Spannungsquelle
 P_a Leistung des Verbrauchers

Für den Grundstromkreis gilt

$$P_a = I^2 R_a ; \quad P_g = I^2 (R_i + R_a)$$

$$\eta = \frac{P_a}{P_g} = \frac{R_a}{R_i + R_a}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$$

(3.52)

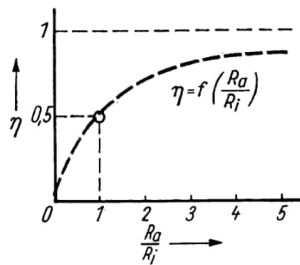


Bild 3.68
Wirkungsgrad im Grundstromkreis in Abhängigkeit von der Belastung

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten, muß

$$R_a \gg R_i$$

sein.

Im Bereich der Leistungselektrotechnik wird aus wirtschaftlichen Gründen ein möglichst hoher Wirkungsgrad angestrebt, um die Verluste bei der Erzeugung der Elektroenergie, ihrer Übertragung und rationellen Verwendung klein zu halten.

Leistungsumsatz mit maximaler Verbraucherleistung

Im Bereich der Informationselektrotechnik werden Informationen meist kleiner Leistungen übertragen. Um Signale unverfälscht an den Empfänger zu übertragen, muß ein möglichst hoher Absolutwert der Leistung abgegeben werden:

$$P_a = \frac{U_a^2}{R_a} = \frac{E^2 R_a}{(R_i + R_a)^2} \rightarrow \max$$

Die Forderung wird erfüllt, wenn

$$R_a = R_i$$

ist. Diesen Fall nennt man **Leistungsanpassung** des Außenwiderstandes an den Spannungsquellenwiderstand. Bei Anpassung beträgt der Wirkungsgrad 50 %.

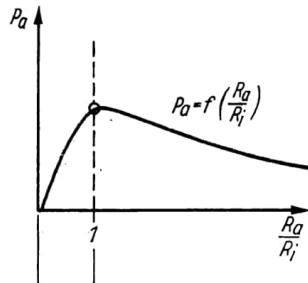


Bild 3.69
Verbraucherleistung in Abhängigkeit von der Belastung eines aktiven Zweipols

Tafel 3.18. Charakteristische Leistungsumsätze bei verschiedenen Voraussetzungen des aktiven Zweipols

Besonderheiten des aktiven Zweipols	Ziel des Leistungsumsatzes	Dimensionierung des Verbrauchers	Ergebnis
Große Spannungsquellenleistung	hoher Wirkungsgrad	$R_a \gg R_i$	$\eta \rightarrow 1$
Kleine Spannungsquellenleistung	maximale Leistung an Verbraucher	$R_a = R_i$ Anpassung	$P_{a \max}$

Beim Studium älterer Fachliteratur findet man häufig noch Einheiten für physikalische Größen, die nicht den SI-Einheiten entsprechen. Um eine Umrechnung in die Einheiten des Internationalen Einheitensystems durchführen zu können, dient die Tafel 3.19.

Tafel 3.19. Umrechnungsbeziehungen zwischen SI-Einheiten und älteren Einheitenangaben

Energieeinheit	J	kW · h	kcal	PS · h	kp · m
1 J = 1 W · s	1 N · m	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	0,102
1 kW · h	$3,6 \cdot 10^6$	1	860	1,36	$0,37 \cdot 10^6$
1 kcal	$4,19 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1	$1,6 \cdot 10^{-3}$	426,9
1 PS · h	$2,65 \cdot 10^6$	0,74	632,4	1	$0,27 \cdot 10^6$
1 kp · m	9,81	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	1
Leistungseinheit	kW	J/s	kcal/h	PS	kp · m/s
1 kW	1	10^3	$0,86 \cdot 10^3$	1,36	102
1 J/s	10^{-3}	1	0,86	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,102
1 kcal/h	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1,16	1	$1,58 \cdot 10^{-3}$	0,119
1 PS	0,74	736	632,4	1	75
1 kp · m/s	$9,81 \cdot 10^{-3}$	9,81	8,43	$13,3 \cdot 10^{-3}$	1
Krafteinheit	N	kp			
1 N = 1 kp · m/s ²	1	0,102			
1 kp	9,81	1			

4. Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern

4.1. Elektrostatistisches Feld

Begriffsbestimmung
„elektrostatistisches
Feld“

Ein elektrostatistisches Feld ist ein elektrisches Feld im Nicht-
leiter.

Wesen und
Erscheinungen

Der Nichtleiter wird als Dielektrikum bezeichnet.

- Das elektrostatistisches Feld ist ein räumlicher Zustand der Materie.
- Es ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie.
- Die Meßgrößen des elektrostatistischen Feldes sind richtungsbehaftet (Vektorfeld).
- Im elektrostatistischen Feld entspringen und enden Feldlinien auf Ladungen.
- Ein elektrostatistisches Feld ist stets mit ruhenden elektrischen Ladungen verknüpft.
- Zwischen elektrischen Ladungen existiert ein Kraftfeld.

Hinweis

Vgl. hierzu Abschn. 2.1., Elektrostatistisches Kraftwirkungsgesetz.

Wirkungen

Das elektrostatistische Feld ist nur erkennbar an seinen Richt- bzw. Kraftwirkungen

- auf frei bewegliche Ladungsträger,
- bei Ladungstrennung,
- bei Ladungsverschiebung.

Die Richtwirkung erstreckt sich auf den gesamten Raum eines Feldes; sie ist in Stärke und Richtung ortsabhängig.

4.2. Darstellung und Erscheinungen des elektrostatistischen Feldes

4.2.1. Feldbilder

Feldlinien

Das elektrostatistische Feld kann mit Hilfe von Feldlinien veranschaulicht werden. Sie beschreiben die Kraftwirkungen des Feldes.

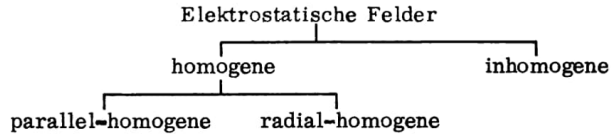
- Die Feldlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Feldlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektrostatistischen Feldes.
- Feldlinien streben einen energieärmeren Zustand an.
Eine Folge daraus sind
Zugkräfte in Richtung längs der Feldlinien,
Druckkräfte in Richtung quer zu den Feldlinien.
- Feldlinien stehen stets senkrecht auf Metallflächen.
- Feldlinien im elektrostatistischen Feld entspringen und enden auf Ladungen. Deshalb wird das elektrostatistische Feld auch als Quellenfeld bezeichnet.

**Definition der
Richtung der
Feldlinien**

Die Richtung der elektrostatischen Feldlinien wird definiert:

Die Feldlinien verlaufen im elektrostatischen Feld von positiven zu negativen Ladungen.

Feldarten



**Parallel-homogene
Felder**

Elektrostatische Felder sind parallel-homogen, wenn die Feldlinien parallel zueinander verlaufen und überall die gleiche Dichte aufweisen.

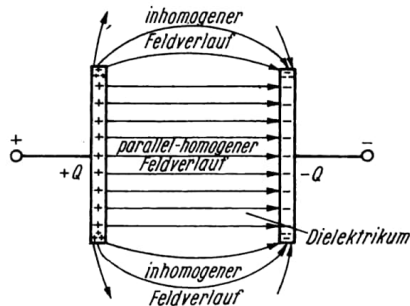


Bild 4.1
Elektrostatisches Feld zwischen
zwei parallelen Platten

**Radial-homogene
Felder**

Bei radial-homogenen Feldern laufen die Feldlinien senkrecht ohne Richtungsänderung von der Oberfläche des geladenen Körpers weg. Die Gegenladung zu $+Q$ liegt unendlich weit weg.

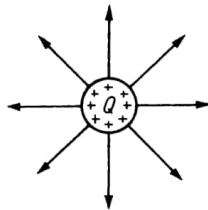


Bild 4.2
Radial-homogenes elektrostatisches Feld
eines Zylinderkörpers

Hinweis

In der Praxis können vollkommen homogene elektrostatische Felder nicht erreicht werden. Homogene Felder sind Idealisierungen der Realität. Homogene Felder werden deshalb angestrebt, weil sie sich mathematisch leicht beschreiben lassen.

Inhomogene Felder

Elektrostatische Felder sind inhomogen, wenn eine der Bedingungen für ein homogenes Feld nicht erfüllt ist.

Beispiele

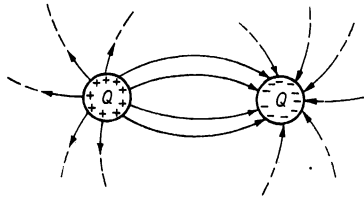


Bild 4.3
Elektrostatisches Feld zweier
ungleichnamig geladener Körper

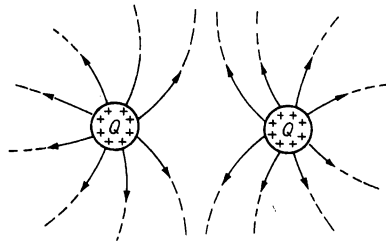


Bild 4.4
Elektrostatisches Feld zweier
gleichnamig geladener Körper

4.2.2. Erscheinungen des elektrostatischen Feldes

Ladungsverschiebung Unter dem Einfluß des elektrostatischen Feldes treten Ladungsverschiebungen auf. Diese Ladungsverschiebungen können Influenz und dielektrische Polarisierung sein.

Influenz

Ist die Ladungstrennung in einem Leiter unter dem Einfluß des elektrostatischen Feldes [influere (lat.) hineinfließen]. Bringt man zwischen zwei Metallplatten mit den Ladungen $+Q$ und $-Q$ einen Leiter, so werden in diesem auf Grund der Kraftwirkung die frei beweglichen Elektronen verschoben. Auf der Oberfläche des Leiters entsteht ein Ladungspaar $+Q$ und $-Q$. Die Ladungen werden so ausgerichtet, daß die positiven Ladungen der negativ geladenen Metallplatte gegenüberstehen und umgekehrt.

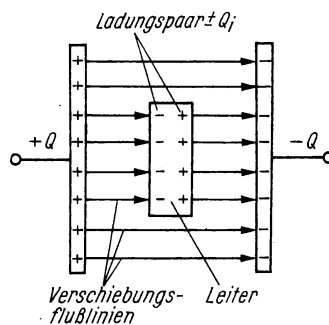


Bild 4.5
Zur Erläuterung der Influenz

Anwendung der Influenzwirkung

Im Inneren eines Hohlraumes, der von einem Leiter vollständig umschlossen ist, befindet sich trotz des Einflusses eines elektrostatischen Feldes ein feldfreier Raum.

Elektrische Abschirmung

Der Innenraum ist elektrisch „abgeschirmt“, da durch Ladungstrennung an der Innenwandung keine Ladungen vorhanden sind.

Beispiel

Die elektrische Abschirmung wird verwendet, um Menschen oder Meßinstrumente vor Hochspannungsfeldern zu schützen oder um elektrische Störfelder fernzuhalten (z.B. Faradayscher Käfig, abgeschirmte Kabel).

Dielektrische
Polarisation
(Dipolbildung)

Dielektrische Polarisation ist die Verschiebung elektrischer Ladungen innerhalb der Moleküle eines Nichtleiters (Dielektrikum).

Unter der Einwirkung des elektrostatischen Feldes tritt eine Verschiebung der elastisch ortsgebundenen Ladungen der Moleküle ein. Die Verschiebung erfolgt entsprechend dem Kraftwirkungsgesetz. Die polarisierten Moleküle erhalten Dipolcharakter.

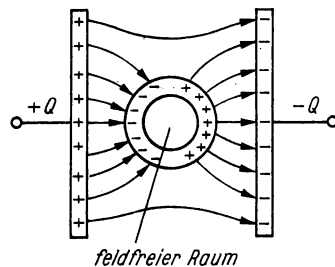


Bild 4.6
Prinzip des Faradayschen Käfigs

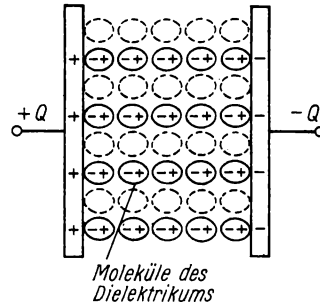


Bild 4.7
Zur Erläuterung der Dipolbildung

4.3. Meßgrößen des elektrostatischen Feldes

Das elektrostatische Feld kann durch physikalische Größen beschrieben und erfaßt werden. Dabei sind zu unterscheiden:

- Wirkungsgrößen,
- Bedingungsgrößen (Vermittlungsgrößen),
- Ursachengrößen.

4.3.1. Verschiebungsfluß, Ladung und Verschiebungsflußdichte

Wirkungsgröße
Verschiebungsfluß

Die Wirkungsgröße des elektrostatischen Feldes ist der Verschiebungsfluß.

Er ist vorstellbar als die Gesamtheit der Verschiebungsflußlinien und kennzeichnet das Vermögen zur Ladungsverschiebung im elektrostatischen Feld.

Verschiebungs-
flußlinien

Sie stellen die Verschiebung dar, beginnen auf der positiven und enden auf der negativen Ladung.

Verschiebungsfluß

Formelzeichen

Ψ

Einheit

Coulomb

$[\Psi] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ C}$

Verschiebungs-
gesetz

Der gesamte Verschiebungsfluß Ψ_{ges} ist gleich der Ladung, aus der er entspringt.

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{ges}} &= Q \\ \Delta\Psi &= \Delta Q\end{aligned}\quad (4.1)$$

Der Verschiebungsfluß im Nichtleiter ist die analoge Größe zum Strom im elektrischen Strömungsfeld.

Hinweis

Strömungslinien unterscheiden sich von Verschiebungsflußlinien dadurch, daß sie immer geschlossen sind.

Dichtegröße
Verschiebungs-
flußdichte

Sie dient zum Beschreiben der Verteilung des Verschiebungsflusses in einem Gebiet analog der Stromdichte im elektrischen Strömungsfeld.

Die von Verschiebungslinien durchsetzte Fläche steht senkrecht zu diesen.

Formelzeichen

D

Physikalischer
Zusammenhang

$$D = \frac{\Delta\Psi}{\Delta A}\quad (4.2)$$

Einheit

$$[D] = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$$

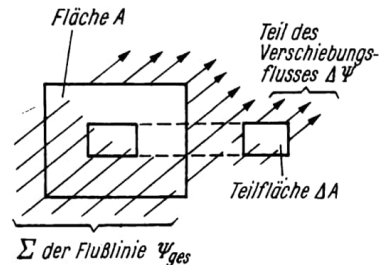


Bild 4.8
Zur Definition der Verschiebungs-
flußdichte

Hinweis

In homogenen elektrostatischen Feldern ist die Flußdichte überall gleich groß. Unter dieser Bedingung gilt

$$D = \frac{\Psi}{A} \quad (4.2a)$$

4.3.2. Spannung und elektrische Feldstärke

Ursachengröße
Elektrische
Spannung

Die Ursachengröße des elektrostatischen Feldes ist die elektrische Spannung.

Wird an zwei parallele Metallplatten eine Spannung U_{AB} angelegt, entsteht durch eine Ladungstrennung über die Leitungen ein Ladungs-
paar $+Q$ und $-Q$.

Zwischen Anfang und Ende einer Feldlinie liegt der Spannungsabfall U_{AB} .
 Der Spannungsabfall längs der Länge Δl (zwischen den Punkten 1 und 2) beträgt ΔU .

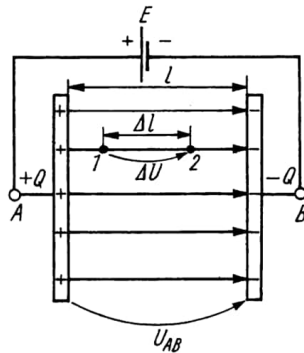


Bild 4.9
Spannungsabfall im elektrostatischen Feld

Elektrische Feld-
stärke

Der Quotient aus Spannungsabfall ΔU je Längeneinheit Δl wird als elektrische Feldstärke bezeichnet.

Hinweis

Die elektrische Feldstärke ist eine Meßgröße des elektrostatischen Feldes und des elektrischen Strömungsfeldes (vgl. Abschn. 3.3.3.).

Formelzeichen E

Physikalischer
Zusammenhang

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

(4.3)

Einheit

$$[E] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}}$$

Für ein homogenes Feld gilt

$$E = \frac{U}{l}. \quad (4.3a)$$

Der Spannungsabfall ΔU zwischen zwei Punkten ist definiert als Energiedifferenz ΔW je Ladung Q zwischen beiden Punkten.

$$\Delta U = \frac{\Delta W}{Q} \quad (4.4)$$

Mit $\Delta W = F \Delta l$

ergibt sich $\Delta U = \frac{F \Delta l}{Q}$

und daraus

$$\frac{\Delta U}{\Delta l} = \frac{F}{Q}.$$

Man erhält den bereits im Abschn. 3.3.2.1. formulierten

physikalischen
Zusammenhang

$$E = \frac{F}{Q}.$$

(4.5)

Darstellung der Kraftwirkung Feldstärkelinien

Die elektrische Feldstärke ist ein Maß für die Größe der Kraftwirkungen. Die Kraftwirkung kann durch Feldstärkelinien dargestellt werden.

Die Dichte der Feldstärkelinien ist dabei ein Maß für die Stärke der Kraftwirkung. Das Auftreten größerer Feldstärken an der „Spitze“ wird bei Blitzableiteranordnungen bewußt genutzt.

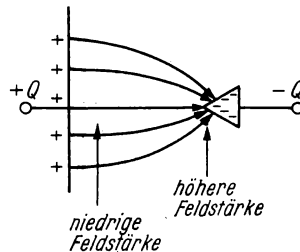


Bild 4.10
Verlauf der Feldlinien bei einer
„Spitze-Platte-Anordnung“

Elektrischer Durchschlag

Im elektrostatischen Feld erfolgt bei Überschreitung einer bestimmten Feldstärke durch Ionisationserscheinungen der Gase bzw. der Gaseinschlüsse im Isolierstoff ein elektrischer Durchschlag, d.h. ein Stromfluß durch den Nichtleiter in einem Durchschlagkanal. Dieser wird hervorgerufen durch die Aufhebung der Bindungskräfte der Ladungen, wobei es zur Bildung einer Bahn höherer Leitfähigkeit kommt. Bei gleichem Abstand der Leiter ist die Höhe der Durchschlagfeldstärke abhängig vom Isolierstoff.

Elektrische Durchschlagfestigkeit

Ist ein Maß für die Spannungsbelastbarkeit eines elektrischen Feldes.

Die elektrische Durchschlagfestigkeit E_D (in $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ oder $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$) ist die elektrische Feldstärke, die sich als Quotient aus der Durchschlagspannung V_D und der Materialdicke d an der Durchschlagstelle ergibt.

Die Verhinderung von elektrischen Durchschlägen hat neben der Vermeidung von elektrischen Überschlüssen eine große Bedeutung bei der Konstruktion und dem Bau von Isolatoren für die Hochspannungstechnik.

Tafel 4.1. Durchschlagfestigkeiten einiger Isolierstoffe

Isolierstoff	Durchschlagfestigkeit	Dicke des Isolierstoffs
	$\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$	
Luft (20 °C, 1,01 bar)	3,3	1 cm ↓ sehr gering sehr gering
Papier	10	
Hartpapier, Porzellan	15	
Kondensa, Tempa	15	
Quarz, Glas, Glimmer, Gummi	25	
Paraffin	40	
Polystyrol	50	
Lackpapier	100	
Aluminiumoxid	100	

Tafel 4.2. Isolierstoffe in der Elektrotechnik

Anorganische Isolierstoffe				Organische Isolierstoffe		
natürliche	künstliche			natürliche	veredelte	künstliche
Luft Schiefer Glimmer Marmor Asbest Speckstein Wasser (dest.)	Mikanit Glas keramische Isolierstoffe			Bernstein Schellack Kolophonium Baumwolle Seide Jute Kautschuk Öle Holz (trocken)	Gummi Papier Preßspan Fiber Hartgewebe Preßstoffe	Kunstfasern Kunstharze Polyvinylchlorid Polystyrol Polyäthylen Polyisobutylene Polyamid Buna Benzine
	Aluminium-Silikat-Keramik (Rohstoffe: Kaolin, Feldspat, Quarz)	Magnesium-Silikat-Keramik (Hauptrohstoff: Speckstein)	Titandioxid-Keramik (Hauptrohstoff: Rutil)			
	Porzellane	Calit Frequentat Steatit	Kondensa Tempa Kerafar			

Elektrischer
Überschlag

Ist das Auftreten von Kriechströmen an der Oberfläche eines Isolierstoffes unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes und bestimmten äußeren Bedingungen, wie z.B. leitfähige Verunreinigungen, hohe Luftfeuchtigkeit oder Auftreten einer Wasserhaut an der Oberfläche des Isolierstoffes. Ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Isolierstoffes gegen Kriechspurbildung ist die Kriechstromfestigkeit.

4.3.3. Dielektrizitätskonstante – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Verschiebungsflußdichte

Einfluß des
Materials

Im Zusammenhang zwischen Feldstärkegröße und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß der verwendeten Materialien zum Ausdruck.

Im homogenen elektrostatischen Feld sind die Feldstärke E und die Verschiebungsflußdichte D proportional der Ladung Q .

Analog zur Beziehung im Strömungsfeld gilt

$$D = \text{Materialkonstante} \cdot E.$$

Die Materialkonstante wird als Dielektrizitätskonstante ϵ (Epsilon) bezeichnet.

Physikalischer
Zusammenhang

$$D = \epsilon E \quad (4.6)$$

Absolute Dielektrizitätskonstante ϵ_0

Die Dielektrizitätskonstante ϵ setzt sich aus einer Naturkonstanten ϵ_0 und einer Vergleichszahl ϵ_r (für das jeweilige Dielektrikum) zusammen.

ϵ_0 wird als absolute Dielektrizitätskonstante oder Influenzkonstante bezeichnet.

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.7)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r

Die relative Dielektrizitätskonstante ist eine Vergleichszahl (Abkürzung DK).

Sie gibt an, wievielmals besser ein Stoff elektrisierbar ist als Vakuum. Unter Elektrisierbarkeit versteht man die Möglichkeiten zum Aufbau eines elektrostatischen Feldes. Die relativen Dielektrizitätskonstanten einiger Isolierstoffe sind in Tafel 4.3 zusammengestellt.

Tafel 4.3. Relative Dielektrizitätskonstanten einiger Isolierstoffe (Mittelwerte)

Isolierstoff	ϵ_r	Isolierstoff	ϵ_r
Vakuum	1	Schellack	3,1
Luft	1	Pertinax (Hartpapier)	4,8
Papiersorten	1,8 ... 2,6	Porzellan	4,5 ... 6
Paraffin	2 ... 2,3	Hartgewebe	5 ... 6
Polystyrol	2,4	Holz	2,5 ... 6,8
Trafoöl	2,2 ... 2,5	Glas	5 ... 10
Gummi	2,7	Glimmer	5 ... 10
Bernstein	2,9	Wasser (dest.)	80

Für die Bauelementefertigung werden keramische Stoffe als Kondensatormassen verwendet. Die Hauptbestandteile und relativen Dielektrizitätskonstanten einiger keramischer Massen sind in Tafel 4.4 zusammengestellt.

Tafel 4.4. Hauptbestandteile und relative Dielektrizitätskonstanten einiger keramischer Massen

Bezeichnung	Hauptbestandteil	ϵ_r
Frequenta	MgSiO ₃	6
Tempa	2 MgO TiO ₂	14- 16
Kondensa	TiO ₂	46- 85
Bariumtitanat	BaTiO ₃	1500- 2200
Epsilon	BaTiO ₃ + Zuschläge	1 000-10 000

Hinweis

Die Namen Frequentia, Tempa, Kondensa und Epsilon waren Markenbezeichnungen und sind nicht mehr gebräuchlich. Auch später eingeführte Gruppenbezeichnungen wie KER 320, KER 310 usw. - das ordnende Element bildete die DK - sind nicht mehr üblich.

Entsprechend den IEC-Empfehlungen werden die Kondensatormassen nach ihrem Temperaturbeiwert geordnet und nach den Kurzbezeichnungen dieser Kennwerte benannt (z.B. P $\hat{=}$ positiv; P 100).

4.3.4. Dielektrischer Verschiebungsstrom

Eine zeitliche Veränderung des elektrostatischen Feldes hat einen Ladungstransport zur Folge. Ändern sich die Ladungen +Q und -Q eines elektrostatischen Feldes, fließt in den Zuleitungen ein Leitungsstrom.

$$I_L = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Solange ein Leitungsstrom fließt, ändert sich die Ladung auf den Platten und somit der Verschiebungsfluß Ψ im Dielektrikum.

Nach Gl. (4.1) ist

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Dielektrischer
Verschiebungsstrom

Die zeitliche Änderung des Verschiebungsflusses wird als dielektrischer Verschiebungsstrom bezeichnet.

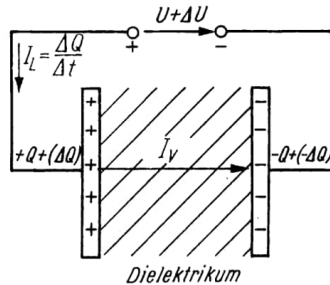


Bild 4.11
Zur Definition des Leitungs- und Verschiebungsstroms

Formelzeichen

I_V

Physikalischer
Zusammenhang

$$I_V = \frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$$

(4.10)

Einheit

$$\left[I_V \right] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ A}$$

Der dielektrische Verschiebungsstrom ist die Stromerscheinung im Nichtleiter und kann als Fortsetzung des Leitungsstromes I_L betrachtet werden.

Es ist

$$I_V = I_L \quad (4.11)$$

Wie jeder elektrische Strom ist auch der dielektrische Verschiebungsstrom mit einem magnetischen Feld verknüpft.

Hinweis

Vgl. Abschn. 5.3.

4.4. Kondensator

4.4.1. Kapazität von Kondensatoren

Begriffsbestimmung
„Kondensator“

Jede beliebige Anordnung „Leiter – Nichtleiter – Leiter“ wird als Kondensator bezeichnet, wenn sie die Eigenschaft hat, elektrische Ladungen zu speichern.

Allgemeines Schaltzeichen:

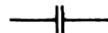


Bild 4.12.

Bedingungsgröße
des elektro-
statischen Feldes

Um die Bedingungsgrößen, die zwischen Wirkungs- und Ursachengrößen des elektrostatischen Feldes vorhanden sind, zu erfassen, wird, wie im elektrischen Strömungsfeld, definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Eigenschaft Kapazität	Im elektrostatischen Feld wird die Kapazität eines Kondensators als Bedingungsgröße eingeführt.
Formelzeichen	C
Physikalischer Zusammenhang	$C = \frac{Q}{U}$ (4.12)
Gültigkeitsbedingung	ebener Plattenschnitt
Einheit	Farad $[C] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ V}} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \text{ F}$
	1 Farad ist eine sehr große, technisch nicht realisierbare Einheit.
	<ul style="list-style-type: none"> • Weitere gesetzliche Einheiten: $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} = 1 \text{ Mikrofarad}$ $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ Nanofarad}$ $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ Pikofarad}$
Farad	Das Farad ist die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge 1 C auf die Spannung 1 V aufgeladen wird.
Speicherung elektrischer Energie	Die Kapazität C gibt Auskunft darüber, wie groß die Speicherfähigkeit eines Kondensators für elektrische Ladungen ist. Die Kapazität entspricht einer Leitwertgröße.
	Hinweis Vgl. Abschn. 3.4.2.1.

4.4.2. Bemessungsgleichung der Kapazität

Bemessung von Kapazitäten	Die Kapazität C ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vor-ausbestimmbar ist. Die Kapazität wird um so größer, <ul style="list-style-type: none"> • je größer die dielektrische Durchlässigkeit des Isolierstoffs ist, • je geringer die Isolierstoffdicke ist, • je größer die Plattenfläche ist.
Bemessungs- gleichung	<div> <div>Physikalischer Zusammenhang</div> <div> $C = \epsilon \frac{A}{l}$ (4.13) </div> </div> <p> C Kapazität in F, l Abstand der Plattenflächen (Isolierstoffdicke) in m, A Plattenfläche in m², ε Dielektrizitätskonstante in A·s/V·m. </p>

4.5. Zusammenschaltung von Kondensatoren

	Wie alle Zweipole können Kondensatoren mit anderen zusammenge-schaltet werden.
Arten der Zu-sammenschaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Reihenschaltung von Kondensatoren • Parallelschaltung von Kondensatoren

Ersatzkapazität

Zur besseren Beschreibung des elektrischen Verhaltens einer Zusammenschaltung von mehreren Kondensatoren wird die Ersatzkapazität C_{ers} gebildet. Die Ersatzkapazität ist die wirksame Gesamtkapazität einer Kondensatorenzusammenschaltung.

4.5.1. Reihenschaltung von Kondensatoren - Ermittlung der Ersatzkapazität

Bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist die Ladungsmenge Q aller Einzelkapazitäten gleich groß.

Für die Reihenschaltung von n Kondensatoren gilt

$$Q_{\text{ers}} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (4.14)$$

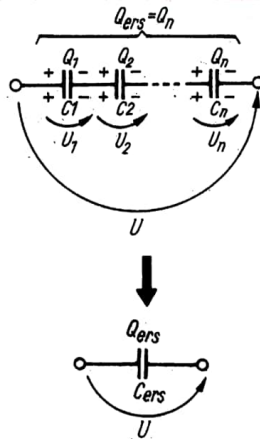


Bild 4.13
Ersatzkapazität einer Reihenschaltung

Für die Summe der Teilspannungen gilt nach dem Maschensatz [Gl. (3.19)]

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (4.15)$$

$$\text{Aus } U = \sum_{k=1}^n U_k; \quad Q_{\text{ers}} = Q_n \quad \text{und}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{Q} \quad \text{ergibt sich}$$

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.16)$$

Ersatzkapazität

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (4.17)$$

Der Kehrwert der Ersatzkapazität ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten.

Bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist die Ersatzkapazität stets kleiner als die kleinste Einzelkapazität.

Durch eine Reihenschaltung von Kondensatoren wird die Kapazität also stets verkleinert.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (4.13) der Kapazität gilt:

Die Verringerung der Kapazität bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist mit der Vergrößerung des Plattenabstandes bzw. der Isolierstoffdicke vergleichbar.

Ersatzkapazität für
n Kondensatoren
gleicher Kapazität

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{n}{C_n}$$

$$C_{\text{ers}} = \frac{C_n}{n} \quad (4.18)$$

Ersatzkapazität
zweier
Kondensatoren

$$C_{\text{ers}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.19)$$

Hinweis

Da die Kapazität eine Leitwertgröße ist, ergeben sich Analogien zur Berechnung von zusammengeschalteten elektrischen Leitwerten.

Nach den Gln. (4.14), (4.16), (4.17) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (4.20)$$

Die Teilspannungen über den Kondensatoren verhalten sich bei einer Reihenschaltung umgekehrt wie die dazugehörigen Kapazitäten.

4.5.2. Parallelschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität

Bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren liegt über jeder Einzelkapazität die gleiche Spannung.

Für die Parallelschaltung von n Kondensatoren gilt

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (4.21)$$

Für die Summe der Ladungsmengen gilt nach dem Knotenpunktsatz [Gl. 3.18]

$$Q_{\text{ers}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (4.22)$$

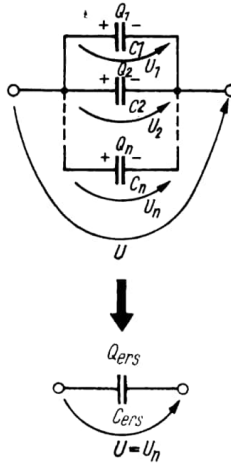


Bild 4.14
Ersatzkapazität einer Parallelschaltung

Aus $U_{\text{ers}} = U_n$; $Q_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n Q_k$ und

$C = \frac{Q}{U}$ ergibt sich

$$C_{\text{ers}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (4.23)$$



Ersatzkapazität

$$C_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n C_k \quad (4.24)$$

Die Ersatzkapazität ist gleich der Summ der Einzelkapazitäten.

Bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren ist die Ersatzkapazität stets größer als die größte Einzelkapazität.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (4.13) der Kapazität gilt:

Die Vergrößerung der Kapazität bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren ist mit einer Vergrößerung der Plattenfläche vergleichbar.

Ersatzkapazität von
n Kondensatoren
gleicher Kapazität

$$C_{\text{ers}} = n C_n \quad (4.25)$$

Nach den Gl. (4.21), (4.22), (4.23) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (4.26)$$

Die Ladungsmengen von Kondensatoren in Parallelschaltungen verhalten sich zueinander wie die dazugehörigen Kapazitäten.

4.6. Kondensatoranordnungen mit geschichtetem Dielektrikum

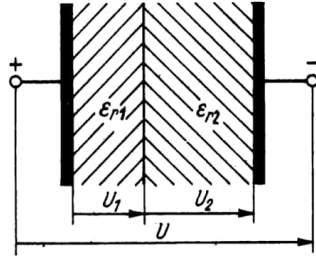


Bild 4.15.
Kondensatoranordnung mit geschichtetem Dielektrikum

Ein Kondensator mit quergeschichteten Isolierstoffen unterschiedlicher relativer Dielektrizitätskonstanten entspricht einer Reihenschaltung von Kondensatoren mit verschiedener Kapazität. Für eine Anordnung mit zwei Schichten gilt

$$\text{Teilkapazität } C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{l_1},$$

$$\text{Teilkapazität } C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{l_2}.$$

Nach Gl. (4.19) ergibt sich

Kapazität bei
geschichtetem
Dielektrikum

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{l_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{l_2}{\epsilon_{r2}}}. \quad (4.27)$$

Spannungs-
verhältnisse

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (4.20a)$$

Die Teilspannungen U_1 und U_2 verhalten sich umgekehrt wie die dazugehörigen Teilkapazitäten.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{l_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{l_1}} \quad \downarrow$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_{r2} l_1}{\epsilon_{r1} l_2} \quad \text{oder} \quad \frac{\frac{U_1}{l_1}}{\frac{U_2}{l_2}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}.$$

$$\text{Mit } E_1 = \frac{U_1}{l_1} \quad \text{und} \quad E_2 = \frac{U_2}{l_2}$$

ergibt sich

Feldstärke-
verhältnisse

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$$

(4.28)

In einer Kondensatoranordnung mit geschichtetem Dielektrikum verhalten sich die Feldstärken zueinander umgekehrt wie die dazugehörigen relativen Dielektrizitätskonstanten.

Aus dem Feldstärkeverhältnis läßt sich ableiten, daß bei Anwendung zweier verschiedener Dielektrika der Stoff mit den schlechteren Isoliereigenschaften durch eine höhere Feldstärke belastet wird.

Schlußfolgerungen für die Praxis

Die Gefahr einer zu hohen Beanspruchung besteht besonders bei Luft-einschlüssen im Dielektrikum.

Der kleine Wert der Dielektrizitätskonstanten für Luft ($\epsilon_r \approx 1$) führt oft zu unzulässig hohen Feldstärken, die Erwärmung und elektrische Durchschläge hervorrufen können (vgl. Abschn. 4.3.2.).

4.7. Erwünschte und unerwünschte Kondensatoranordnungen

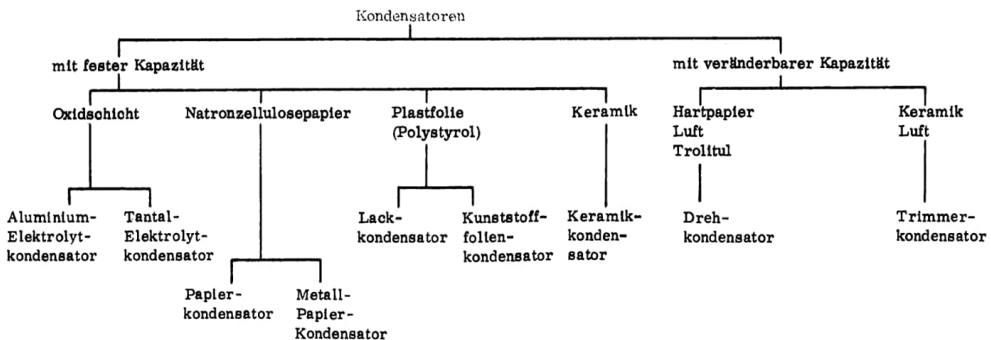
Erwünschte Kon-
densatoranordnung

Elektrotechnisches
Grundbauelement
Kondensator

Der Kondensator ist das Bauelement, das als technisches Objekt auf den Gesetzmäßigkeiten der Erscheinungen im Nicht-leiter beruht.

Der Kondensator ist wie der Widerstand und die Spule ein Grundbauelement der Elektrotechnik.

Tafel 4.5. Einteilung der Kondensatoren nach dem Dielektrikum



An Kondensatoren werden technisch notwendige Forderungen gestellt:

- Konstanz der Kapazität,
- veränderbare oder feste Kapazität,

- Spannungsbelastbarkeit,
- Bauform je nach Einsatzzweck.

Diese konstruktiven Eigenschaften bestimmen den Einsatz von Kondensatoren.

Hinweis

Vgl. auch Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

Unerwünschte
Kondensator-
anordnung

Aus der Definition eines Kondensators geht hervor, daß voneinander isolierte Leiter oder leitfähige Materialien, zwischen denen eine Spannung anliegt, eine Kondensatoranordnung darstellen. In elektrischen Schaltungen und Anlagen treten unerwünschte Kapazitäten auf

- zwischen parallellaufenden elektrischen Leitungen,
- zwischen Leitungen und benachbarten Metallteilen von Gehäusen oder Gestellen,
- zwischen Windungen von Spulen,
- zwischen Schalterkontakten,
- zwischen Anschlußfahnen von Röhren- und Transistorfassungen,
- zwischen Elektroden elektrischer Bauelemente.

4.8. Verlustlose und verlustbehaftete Kondensatoren

Verlustlose
Kondensatoren

Verlustlose Kondensatoren sind idealisierte Kondensatoren. Sie dienen zur besseren theoretischen Erfassung von bestimmten Eigenschaften.

Derartige Kondensatoren sind technisch nicht realisierbar, da die als Dielektrikum verwendeten Stoffe keine absoluten Nichtleiter sind.

Hinweis

Vgl. Abschn. 2. 2.

Verlustbehaftete
Kondensatoren

Alle technischen Kondensatoranordnungen sind verlustbehaftet und damit reale Kondensatoren.

In einem Kondensator treten

- Isolationsverluste und
- dielektrische Verluste

auf.

Die in einem Kondensator auftretenden Verluste werden in einem Verlustwiderstand R_V zusammengefaßt, der im Ersatzschaltplan parallel zu einem verlustlosen Kondensator liegt.

Die Verluste führen zu einer Erwärmung des Kondensators.

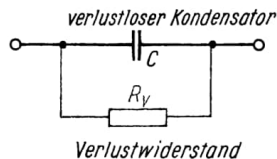


Bild 4.16. Ersatzschaltung eines verlustbehafteten Kondensators

Isolationsverluste

Durch den endlichen Isolationswiderstand des Dielektrikums fließt ein Isolations- oder Leckstrom.

Dielektrische
Verluste

Die energiebehaftete elastische Verformung (dielektrische Polarisation) der Moleküle des Dielektrikums führt zu dielektrischen Verlusten.

4.9. Verhalten von Kondensatoren bei verschiedenen Betriebsarten

4.9.1. Verhalten von Kondensatoren an unveränderlicher Gleichspannung

Das Dielektrikum eines idealen Kondensators ist absoluter Nichtleiter.

Zwischen den Platten fließt kein Strom. Auf den Kondensatorplatten herrscht ein Elektronenüberschuß bzw. -mangel (+Q, -Q).

Wird ein geladener Kondensator aus dem Stromkreis entfernt, so bleibt das Ladungspaar +Q, -Q auf den Platten bestehen.

(Voraussetzung: Widerstand des Dielektrikums unendlich groß.)

Der ideale Kondensator wirkt als Speicher elektrischer Energie.

Es tritt keine Energie aus dem Stromkreis heraus.

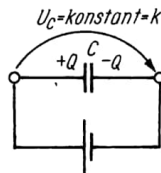


Bild 4.17
Kondensator an
unveränderlicher Gleichspannung

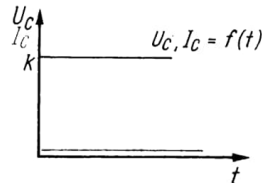


Bild 4.18
Strom- und Spannungsverlauf bei
unveränderlicher Gleichspannung

4.9.2. Verhalten von Kondensatoren an veränderlicher Gleichspannung

Jede Spannungsänderung am Kondensator führt zu einem Ladungstransport.

Gl. (4.12) erhält die Form

$$\Delta Q = C \Delta U.$$

Mit Gl. (3.1), $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, wird

$$I = C \frac{\Delta U}{\Delta t}. \quad (4.29)$$

An einem Kondensator fließt nur ein Strom, wenn und solange sich die über dem Kondensator liegende Spannung zeitlich ändert.

Der Strom ist von der richtungsbehafteten zeitlichen Spannungsänderungsgeschwindigkeit abhängig.

$$I \sim \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

Die Stromrichtung ist bei

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} > 0 \quad \text{positiv,}$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} < 0 \quad \text{negativ}$$

definiert.

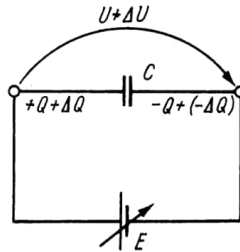


Bild 4.19
Kondensator an veränderlicher
Gleichspannung

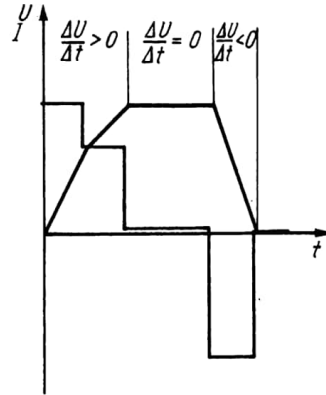


Bild 4.20
Strom- und Spannungsverlauf bei
veränderlicher Gleichspannung

4.9.3. Verhalten von Kondensatoren bei Schaltvorgängen

4.9.3.1. Begriffsbestimmungen bei Schaltvorgängen

Einschaltvorgang

Einschalten ist das zeitlich sprunghafte Anwachsen einer beliebigen Speisespannung U_N von Null auf einen bestimmten Wert in der Zeitänderung $\Delta t = 0$.

Für allgemeine Betrachtungen ist es unbedeutend, auf welche Weise die Speisespannung U_N erzeugt wird.
Der Einschaltvorgang wird idealisiert betrachtet, da er praktisch in $\Delta t = 0$ nicht realisiert werden kann.

Einschaltzeitpunkt

Ist diejenige Zeit t_{ein} , in der das sprunghafte Anwachsen der geschalteten Größe stattfindet.

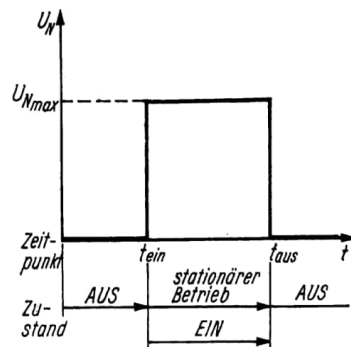


Bild 4.21
Verhalten eines Kondensators bei
Einschalt- und Ausschaltvorgängen

Betriebszustand
oder
stationärer Betrieb

Kennzeichnet das zeitlich beliebig lange Erhalten einer bestimmten Spannung.

Ausschaltvorgang

Ausschalten ist das zeitlich sprunghafte Sinken einer beliebigen Speisespannung U_N von ihrem augenblicklichen Wert auf den Wert Null in der Zeitänderung $\Delta t = 0$.

Der Ausschaltvorgang wird idealisiert betrachtet, da er praktisch in $\Delta t = 0$ nicht realisiert werden kann.

Ausschaltzeitpunkt

Ist diejenige Zeit t_{aus} , in der das sprunghafte Sinken der geschalteten Größe stattfindet.

4.9.3.2. Lade- und Entladevorgänge an Kondensatoren

Laden und Entladen
von Kondensatoren

Ein ungeladener Kondensator mit der Kapazität C wird zum Zeitpunkt $t = t_{\text{ein}}$ mit Hilfe eines Umschalters S über einen Wirkwiderstand R_1 an eine Gleichspannung U_N angeschlossen.

Der geladene Kondensator kann über R_2 wieder entladen werden.

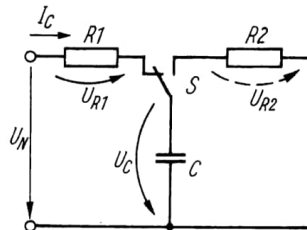


Bild 4.22
Prinzipschaltplan für das Ein- und
Ausschalten eines Kondensators

Hinweis

Für die allgemeine Betrachtung wird ein idealer Kondensator mit einem Verlustwiderstand $R_V = \infty$ angenommen (vgl. Abschn. 4.8.).

Spannung am
Kondensator beim
Einschalten und
nach dem
Einschalten

Einschaltzeitpunkt	$t = t_{\text{ein}}$	$U_C = 0$ $U_{R1} = U_N$	$\Delta t = 0$
Nach dem Einschalten	$t = t_1$	$U_C > 0$ $U_{R1} < U_N$	$\Delta t > 0$
	$t = t_2$	$U_C \gg 0$ $U_{R1} \ll U_N$ $U_C \approx U_N$	$\Delta t > 0$

Dem Verlauf von U_C liegt eine Gesetzmäßigkeit des natürlichen Wachstums zugrunde. Die entsprechenden funktionalen Abhängigkeiten sind Exponentialfunktionen.

Für den Verlauf von U_C gilt

$$U_C = U_N - \frac{U_N}{e^{\frac{t}{RC}}} = U_N \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (4.30)$$

Ein ungeladener Kondensator wirkt beim Einschalten wie ein Kurzschluß, da die Spannung U_C Null ist.

Die Spannung an einem Kondensator, der auf ein Netz zugeschaltet wird, steigt zeitlich verzögert an.

Der stationäre Betriebszustand an Kondensatoren tritt erst zeitlich verzögert nach dem Einschaltzeitpunkt t_{ein} ein.

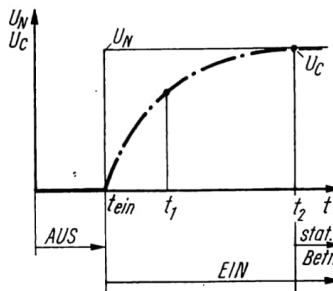


Bild 4.23
Spannungsverlauf beim Einschalten und nach dem Einschalten

Spannung am
Kondensator beim
Ausschalten und
nach dem
Ausschalten

Ausschalt- zeitpunkt	$t = t_{\text{aus}}$	$U_C = U_N$ $U_{R2} = U_N$	$\Delta t = 0$
Nach dem Ausschalten	$t = t_3$	$U_C < U_N$ $U_{R2} < U_N$	$\Delta t > 0$
	$t = t_4$	$U_C = 0$ $U_{R2} = 0$ $U_C \ll U_N$	$\Delta t > 0$

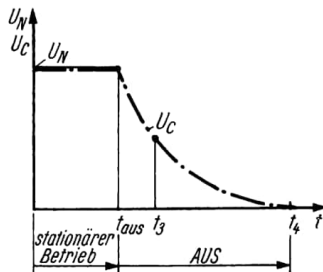


Bild 4.24
Spannungsverlauf beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

Ausschalt- bzw.
Entladevorgänge

Über den Entladewiderstand R_2 erfolgt ein Ladungsausgleich. Die Spannung am Kondensator sinkt je nach Größe der Kapazität und des Entladewiderstandes zeitverzögert.
Für den Verlauf von U_C gilt

$$U_C = \frac{U_N}{e^{\frac{t}{RC}}} = U_N e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.31)$$

Ein geladener Kondensator wirkt beim Ausschalten wie eine Spannungsquelle.

Die Spannung an einem Kondensator, der über einen geeigneten Entladestromkreis entladen wird, geht zeitlich verzögert auf Null zurück.

Strom im Kondensatorstromkreis
beim Einschalten
und nach
dem Einschalten

Nach Gl. (4.29) fließt beim Einschalten ein Strom. Im Einschaltzeitpunkt t_{ein} ist die Spannungsänderung am größten.
Bei einer zeitlichen Änderung $\Delta t = 0$ ergibt sich ein Einschalt- oder Ladestromstoß. Je geringer die Spannungsdifferenz zwischen der Kondensatorspannung U_C und der Speisespannung U_N wird, desto geringer ist der zur Ladungsspeicherung erforderliche Strom I_C .

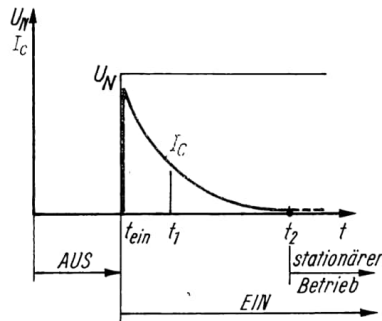


Bild 4.25
Stromverlauf beim Einschalten und
nach dem Einschalten

Für den Verlauf des Einschalt- oder Ladestromes gilt

$$I_C = \frac{U_N}{R} \frac{1}{e^{\frac{t}{RC}}} = \frac{U_N}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.32)$$

Beim Einschalten eines ungeladenen Kondensators entsteht ein hoher Ladestromstoß.

Strom im Kondensatorstromkreis
beim Ausschalten
und nach
dem Ausschalten

Im Ausschaltzeitpunkt t_{aus} hat ebenfalls die Spannungsänderung ihren größten Wert. Bei einer zeitlichen Änderung $\Delta t = 0$ ergibt sich wiederum ein großer Abschalt- oder Entladestromstoß, der dem Einschalt- oder Ladestromstoß entgegengerichtet ist (vgl. Abschnitt 4.9.2.).

Für den Verlauf des Abschalt- oder Entladestroms gilt

$$I_C = - \frac{U_N}{R} \frac{1}{e^{\frac{t}{RC}}} = - \frac{U_N}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.33)$$

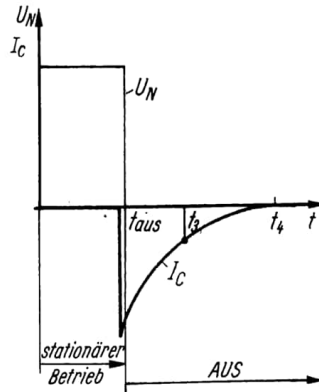


Bild 4. 26
Stromverlauf beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

Hinweis

U_N vorzeichenbehaftet einsetzen.

Ist der Entladewiderstand $R = 0$, fließt ein hoher Kurzschlußstrom, der schädliche Auswirkungen auf den Kondensator haben kann:

- Beschädigung der Zuleitungen zu den Belägen,
- elektrodynamische Kraftwirkungen.

Geladene Kondensatoren dürfen nie kurzgeschlossen und darum nur über geeignete Widerstände entladen werden.

Hinweis

Im Gegensatz zu diesem Grundsatz werden Starkstromkabel abgeschaltet, geerdet und kurzgeschlossen.

Energiebetrachtungen für den geschalteten Kondensator

Energieumwandlung beim Aufladevorgang

Kinetische Energie

Wird ein Kondensator durch eine Speisespannung U_N aufgeladen, erfolgt ein Energieumsatz. Der Speisespannungsquelle wird Energie entzogen, die zum Aufbau des elektrostatischen Feldes im Kondensator dient und eine Ladungsverschiebung im Dielektrikum bewirkt (vgl. Abschn. 4.3.1.).

Beim Aufladen eines Kondensators wird kinetische Energie des elektrischen Strömungsfeldes benötigt. Nach Gln. (3.3) und (3.44) ist die zum Aufbau des elektrostatischen Feldes an den Kondensator abgegebene Energie

$$\Delta W = \Delta Q U_C \quad \text{oder} \\ \Delta W = U_C I_C \Delta t$$

Energiespeicherung Potentielle Energie

Ist das elektrostatische Feld vollkommen aufgebaut, stellt sich ein stationärer Betriebszustand ein, indem die vorher vorhandene kinetische Energie bewegter Ladungen in Form potentieller Energie ruhender Ladungen im Kondensator gespeichert wird.

Hinweis

Die zugeführte Energie tritt also nicht, wie im Abschn. 3.8.1.2. für Widerstände dargestellt, aus dem Kreis in Form von thermischer, mechanischer oder chemischer Energie heraus.

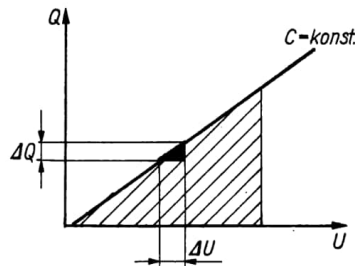
Für die im Kondensator gespeicherte Energie gilt:

$$W_C = \frac{C U_C^2}{2} \quad (4.34)$$

Eine vollständige Herleitung dieser Beziehung erfordert Kenntnisse der höheren Mathematik.

Eine Möglichkeit für das Verständnis der Gl. (4.34) bietet sich mit Hilfe einer grafischen Konstruktion. Nach vollständiger Aufladung eines Kondensators mit konstanter Kapazität bestehen die Bedingungen (vgl. Bild 4.27):

$$Q = \text{konst.} \quad U_C = U_N = \text{konst.} \quad C = \text{konst.}$$



Der Flächeninhalt des schraffierten Dreiecks entspricht dem gespeicherten Energieinhalt.

Bild 4.27
Zum Energieinhalt des elektrostatischen Feldes

Aus Bild 4.27 wird gleichfalls deutlich, daß die angegebenen Beziehungen sich auch auf sehr kleine Spannungs- und Ladungsmengen anwenden lassen (kleines schwarzes Dreieck). Das ist dann von Bedeutung, wenn Q und U nicht proportional verlaufen. Dann kann der Energieinhalt aus der Summierung kleinster Flächen ermittelt werden.

Energieinhalt des elektrostatischen Feldes

Weiterhin gelten

$$W = Q U \quad \text{und} \quad Q = C U$$

Damit ist $Q \sim U$.

Aus einer Dreiecksberechnung folgt

$$W_{\text{pot}} = \frac{U Q}{2}$$

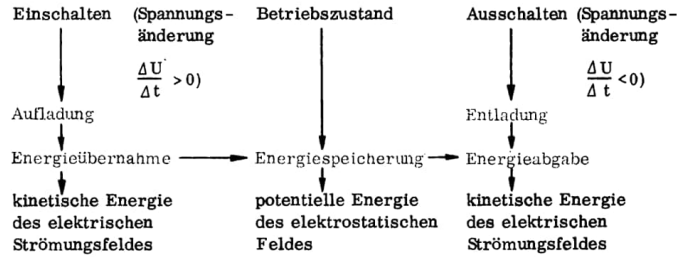
und mit $Q = C U$ entsteht

$$W_{\text{pot}} = \frac{C U^2}{2} \quad (4.34)$$

Über die Einheiten kann die Richtigkeit der Beziehung überprüft werden.

$$\left[W_{\text{pot}} \right] = \frac{1 \text{ A} \cdot \text{s} \cdot 1 \text{ V}^2}{1 \text{ V}} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

Tafel 4.6. Energiebetrachtung



4.10. Zeitkonstante von Kondensatoren

In den Gln. (4.30) bis (4.33) erscheint der mathematische Ausdruck RC . Das Produkt aus Widerstand R und Kapazität C ist eine Konstante, die Bedeutung für alle Schaltvorgänge hat.

Zeitkonstante

Die Konstante hat die Maßeinheit einer Zeit und wird deshalb als Zeitkonstante τ bezeichnet.

Physikalischer
Zusammenhang

$$\tau = CR$$

(4.35)

Einheit

$$[\tau] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ V}}{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}} = 1 \text{ s}$$

Die Zeitkonstante τ gibt die Zeit an, nach der der Ladestrom auf das $\frac{1}{e}$ -fache (etwa 37 %) seines Anfangswertes abgeklungen ist bzw. die Kondensatorspannung das $(1 - \frac{1}{e})$ -fache (etwa 63 %) ihres Endwertes erreicht hat.

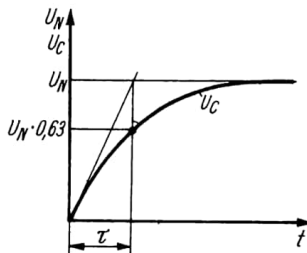


Bild 4.28
Ermittlung der Zeitkonstanten aus dem
Spannungverlauf

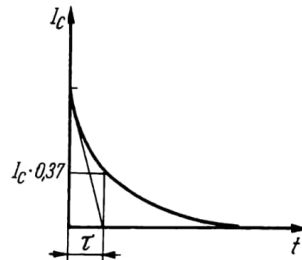


Bild 4.29
Ermittlung der Zeitkonstanten aus dem
Stromverlauf

Halbwertszeit

Als Halbwertszeit t_H wird die Zeit bezeichnet, nach der die Kondensatorspannung die Hälfte ihres Endwertes erreicht hat.

$$t_H = 0,7 \tau$$

(4.36)

Praktische Bezüge

Die in den Bildern 4.23 bis 4.29 dargestellten Funktionen gelten in der Praxis als abgeklungen, wenn

$$t \approx 5 \tau \text{ ist.}$$

Dieser Richtwert ist insbesondere in der Signalübertragung von Bedeutung.

5. Elektromagnetische Erscheinungen

5.1. Elektromagnetisches Feld

Begriffsbestimmung
„elektro-
magnetisches Feld“

Der physikalische Raum, in dem elektromagnetische Erscheinungen auftreten, wird als elektromagnetisches Feld bezeichnet.

Obwohl das Auftreten magnetischer Felder immer mit bewegten elektrischen Ladungen verknüpft ist, verwendet man in der Fachliteratur häufig nur den Begriff „magnetisches Feld“. Mit dem Begriff „elektromagnetisches Feld“ werden umfassendere Erscheinungen beschrieben. Im Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ soll aus Gründen der Einheitlichkeit der Begriff „elektromagnetisches Feld“ verwendet werden.

Wesen und
Erscheinungen

- Das elektromagnetische Feld ist ein räumlicher Zustand der Materie. Es ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie.
- Die Meßgrößen des elektromagnetischen Feldes sind richtungsbehaftet (Vektorfeld).
- Die Feldlinien sind in sich geschlossen.
- Das Auftreten elektromagnetischer Felder ist stets mit bewegten elektrischen Ladungen verknüpft.

Wirkungen

Das elektromagnetische Feld ist an seinen Kraftwirkungen

- auf bestimmte Stoffe (besonders Eisen, Nickel, Kobalt),
- auf Ladungsträger (Elektronen, Ionen)

erkennbar und nachweisbar.

Aus der Energie des elektromagnetischen Feldes kann unter bestimmten Bedingungen elektrische Energie zurückgewonnen werden.

5.2. Darstellung und Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes

5.2.1. Feldbilder

Feldlinien

Das elektromagnetische Feld kann mit Hilfe von Feldlinien veranschaulicht werden. Diese beschreiben die Kraftwirkungen des Feldes auf magnetisierbare Stoffe.

- Die Feldlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Feldlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektromagnetischen Feldes.
- Feldlinien haben das Bestreben, sich zu verkürzen.
- Eine Folge daraus sind Zugkräfte längs zu den Feldlinien und Druckkräfte quer zu den Feldlinien.

Hinweis

Vgl. auch Abschnitte 3.3. und 4.2.

Magnetpole

Sind Stellen der größten magnetischen Wirksamkeit im elektromagnetischen Feld.

Es wird zwischen magnetischem Nordpol und Südpol unterschieden.

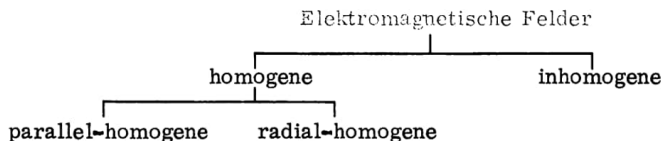
Magnetisches Kraftwirkungsgesetz

Entgegengesetzte magnetische Pole ziehen einander an, gleichmagnetisierte Pole stoßen einander ab.

Richtung der Feldlinien

Festlegung: Feldlinien verlaufen außerhalb eines Magneten vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol, im Magneten vom Südpol zum Nordpol.

Feldarten



Parallel-homogene Felder

Feldlinien laufen parallel zueinander und weisen überall die gleiche Dichte auf.

Radial-homogene Felder

Feldlinien laufen senkrecht ohne Richtungsänderung von der Oberfläche der Polkante weg.

Inhomogene Felder

Erfüllen nicht die Bedingungen für ein homogenes Feld.

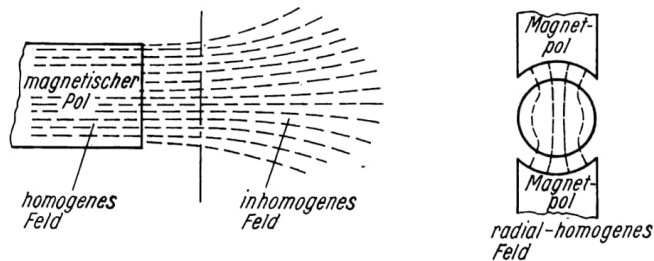


Bild 5.1. Feldlinienverläufe

Hinweis

In der Praxis können vollkommen homogene elektromagnetische Felder nicht erreicht werden. Homogene Felder sind Idealisierungen der Realität.

5.2.2. Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes

Ferromagnetische Werkstoffe (Fe, Co, Ni) im Magnetfeld

Wird ein ferromagnetischer Werkstoff dem Magnetfeld

- einer stromdurchflossenen Spule
- eines Permanentmagneten

genähert, erfolgt eine starke Ausrichtung der Weisschen Bezirke im Ferromagnetikum.

Nach dem elektromagnetischen Kraftwirkungsgesetz werden die Elementarmagneten beeinflusst.

Diesen Vorgang bezeichnet man als magnetische Influenz.

Bringt man ein ferromagnetisches Material in ein Magnetfeld ein, so ist eine Feldveränderung feststellbar (Bild 5.2).

Ein Ferromagnetikum bündelt elektromagnetische Feldlinien.

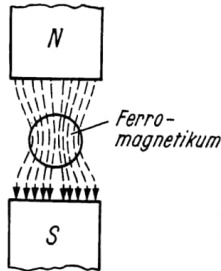


Bild 5.2
Ferromagnetika im Magnetfeld

Magnetische
Abschirmung

Die abschirmende Wirkung von ferromagnetischen Ringen (Bild 5.3) wird technisch angewandt

- bei Meßwerkabschirmungen.
- zum Schutz von Einrichtungen gegen störende Magnetfelder.

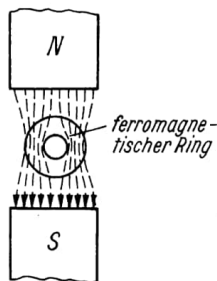


Bild 5.3
Feldfreier Raum im Inneren eines Eisenringes

5.3. Elektromagnetische Felder elektrischer Ströme

Jede Bewegung elektrischer Ladungen erzeugt ein elektromagnetisches Feld.

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem elektromagnetischen Feld „umwirbelt“. Deshalb wird das elektromagnetische Feld auch als Wirbelfeld bezeichnet.

Dies bedeutet, daß sowohl das elektrische Strömungsfeld als auch jede Ladungsbewegung im elektrostatischen Feld mit dem Auftreten von elektromagnetischen Feldern verknüpft sind.

Daraus kann geschlußfolgert werden, daß prinzipiell alle drei Felder der Elektrotechnik immer gemeinsam auftreten.

Ihre Wirkungen und damit der Grad der Vernachlässigbarkeit sind unterschiedlich groß.

5.3.1. Magnetfelder stromdurchflossener geradliniger Leiter

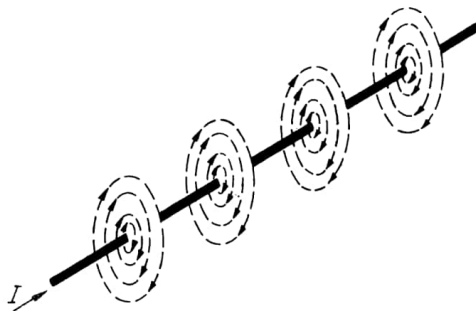


Bild 5.4. Magnetfeld eines geradlinigen stromdurchflossenen Leiters

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben.

Richtungszuordnung:

Die Feldlinienrichtung wird der Richtung des elektrischen Stromes im Sinne der Rechtsschraube zugeordnet.

Rechte-Faust-Regel

Umschließt man einen stromdurchflossenen Leiter so mit der rechten Faust, daß der abgespreizte Daumen in Stromflußrichtung zeigt, dann zeigen die gekrümmten Finger in Feldlinienrichtung.

Hinweis

Auf der gleichen Grundlage sind die sog. „Schraubenzieherregel“ und „Korkenzieherregel“ anwendbar.

Bei der praktischen Anwendung dieser Richtungszuordnung wird die positive Stromrichtung (vgl. Abschn. 3.3.1.1.) zugrunde gelegt.

Aus Gründen der praktischen Vereinfachung wird meist eine andere Darstellungsform verwendet.

Der linienhafte elektrische Leiter wird im Schnitt dargestellt.

Der durchfließende elektrische Strom hat dabei zwei mögliche Richtungen:

	Symbolik
auf den Betrachter zufließend	
vom Betrachter wegfließend	

Schnitt A-A

Schnitt B-B

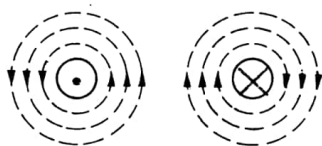


Bild 5.5
Schnittdarstellung stromdurchflossener Leiter


5.3.2. Magnetfelder stromdurchflossener Spulen

Spule

Jede beliebige stromdurchflossene Leiteranordnung kann als Spule aufgefaßt werden. Sie ist durch das Vorhandensein des elektromagnetischen Feldes gekennzeichnet.

Eine Spule ist ein aus mehreren Drahtwindungen bestehender Leiter.

Die Energie wird im magnetischen Feld, das sich in der Umgebung der Spule ausbildet, gespeichert.

Allgemeines Schaltzeichen:  Bild 5.6

Hinweis

Ein geradliniger Leiter kann zwischen Anfang und Ende auch als Spule mit der Windungszahl 1 angesehen werden.

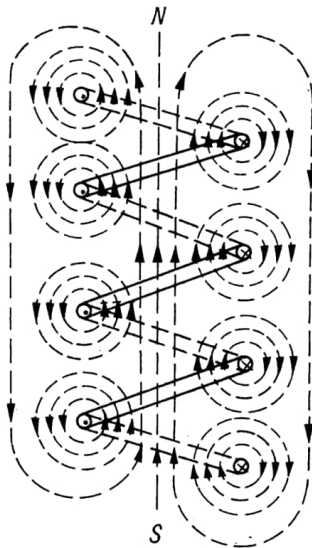


Bild 5.7
Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Jede Spule, die vom elektrischen Strom durchflossen wird, erzeugt im Inneren und im Raum um die Spule ein elektromagnetisches Feld.

Dabei ist zu beachten, daß sich die Magnetfelder der einzelnen Windungen zu einem resultierenden elektromagnetischen Gesamtfeld addieren.

Umschließt man eine stromdurchflossene Spule so mit der rechten Faust, daß die gekrümmten Finger in Stromrichtung zeigen, so zeigt der abgespreizte Daumen auf einen Nordpol.

Hinweis

Auf der gleichen Richtungsfestlegung wie im Abschn. 5.3.1. beruht die sog. „Uhrzeigerregel“.

Nutzfeld

Das von den Spulenwindungen umfaßte Magnetfeld.

Streufeld

Das außerhalb der Spule vorhandene Magnetfeld.

Homogenisierung

Je länger zylindrische Spulen gestaltet werden, desto stärker wird das im Inneren der Spulen entstehende elektromagnetische Nutzfeld homogenisiert.

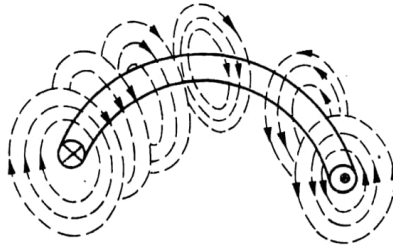


Bild 5.8
Magnetfeld einer symbolisierten
Spulenwindung

5.4. Meßgrößen des elektromagnetischen Feldes

5.4.1. Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte

Wirkungsgröße
Magnetfluß

Die Wirkungsgröße des elektromagnetischen Feldes ist der magnetische Fluß.

Hinweis

Der Begriff „Fluß“ ist irreführend, denn in Wirklichkeit ist das elektromagnetische Feld ein Raumzustand. „Fluß“ darf nicht mit „Strom“ gleichgesetzt werden. Allerdings bestehen Vergleichsmöglichkeiten.

Unter dem Magnetfluß versteht man die Gesamtheit der Feldlinien des elektromagnetischen Feldes. Er gibt Aufschluß über die Größe der Wirkungen des Feldes.

Formelzeichen Φ

Einheit Weber
 $[\Phi] = V \cdot s = 1 \text{ Wb}$

(Wilhelm Weber, 1804–1891, deutscher Physiker)

Dichtegröße
Magnetflußdichte

Die Anzahl der Feldlinien innerhalb bestimmter, vom Magnetfluß durchsetzter Flußflächen.

Formelzeichen B

Physikalischer Zusammenhang $B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$ (5.1)

Einheit Tesla
 $[B] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ Wb}}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ T}$

(Nicola Tesla, 1856–1943, serbokroatischer Physiker)

Hinweise

In homogenen magnetischen Feldern ist die Flußdichte überall gleich groß.

Die Berechnung der Dichte elektromagnetischer Streufelder ist relativ kompliziert, weil dort unterschiedliche Feldlinienverteilung vorliegt.

Je größer die Fläche des Magnetmaterials bei vorgegebenem Magnetfeld (z.B. Eisen, aber auch Luft oder andere Medien) ist, desto geringer wird die Dichte des elektromagnetischen Feldes. In der Praxis ist man bemüht, möglichst hohe Magnetflußdichten zu erreichen, um eine Einsparung von Magnetmaterial zu garantieren.

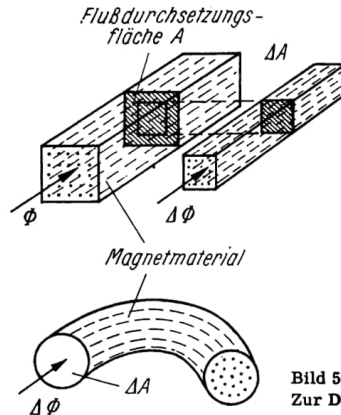


Bild 5.9
Zur Definition der Magnetflußdichte

5.4.2. Magnetische Durchflutung und magnetische Feldstärke

Ursachengröße
Magnetische Durchflutung

Die Ursachengröße des elektromagnetischen Feldes ist die magnetische Durchflutung.

Hinweis

In vergangenen Jahren wurde die Ursachengröße auch als „magnetische Urspannung“ oder als „magnetomotorische Kraft“ bezeichnet. Diese Begriffe werden nicht mehr benutzt, da sie zu Irrtümern führen können.

Formelzeichen Θ (Theta)

Einheit $[\Theta] = 1 \text{ A}$

Die magnetische Durchflutung wird ursächlich durch das Vorhandensein eines elektrischen Stromes hervorgerufen. In dieser Größe muß also die Verknüpfung zwischen der Energie des elektrischen Strömungsfeldes und der Energie des elektromagnetischen Feldes zum Ausdruck kommen.

Energieumwandlung
elektrisch/
magnetisch

Das Energiewandlerelement ist in der Regel eine stromdurchflossene Spule mit der Windungszahl N .

Es gilt

$$\Theta = I N$$

(5.2)

$N = 1, 2, 3, \dots, n$

(vgl. Abschn. 5.5.3.).

Magnetische Feldstärke

Sie wurde eingeführt, um die Stärke der Kraftwirkungen des elektromagnetischen Feldes noch exakter zu erfassen. Sie beschreibt, in welcher Höhe die magnetische Durchflutung entlang den in sich geschlossenen Feldlinien wirksam werden kann. Je geringer der Weg entlang den Feldlinien wird, desto mehr Energie kann das elektromagnetische Feld entwickeln.

Formelzeichen

H

Physikalischer
Zusammenhang

$$H = \frac{\Theta}{l} = \frac{I N}{l}$$

(5.3)

Einheit

$$[H] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ m}}$$

In der Praxis wird mit mittleren magnetisch wirksamen Feldlinienlängen gerechnet.

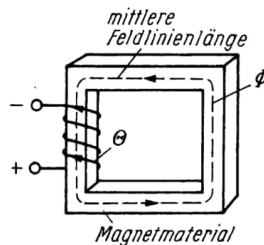


Bild 5.10

Zur Veranschaulichung der mittleren Feldlinienlänge

Hinweis

Bei der Berechnung inhomogener Felder sind zusätzliche Überlegungen notwendig, da hier nicht ohne weiteres mit mittleren Feldlinienlängen gerechnet werden kann.

5.4.3. Definition des magnetischen Leitwertes

Bedingungsgröße
des elektro-
magnetischen Feldes

Um die Bedingungsgrößen, die zwischen Wirkungs- und Ursachengrößen des elektromagnetischen Feldes vorhanden sind, zu erfassen, wird wie im elektrischen Strömungsfeld und im elektrostatischen Feld definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Ebenso ist der reziproke Wert des Quotienten als Definition möglich. Im elektromagnetischen Feld wird der magnetische Leitwert als Bedingungsgröße eingeführt.

Magnetischer
Leitwert

Formelzeichen

Λ

Physikalischer
Zusammenhang

$$\Lambda = \frac{\Phi}{\Theta} = \text{konst.}$$

(5.4)

Einheit

Henry

$$[\Lambda] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega \cdot 1 \text{ s} = \frac{1 \text{ s}}{1 \text{ S}} = 1 \text{ H}$$

(Joseph Henry, 1797-1878, amerikanischer Physiker)

Der magnetische Leitwert gibt Auskunft darüber, wie stark sich der magnetische Fluß in einem bestimmten Magnetmaterial im Magnetkreis auswirken kann.

Der magnetische Gesamtleitwert umfaßt alle in einem magnetischen Kreis vorhandenen magnetischen Leitwerte.

5.4.4. Bemessung des magnetischen Leitwertes

In einem geschlossenen magnetischen Kreis wird der magnetische Leitwert als Quotient aus dem gesamten Magnetfluß und der gesamten magnetischen Durchflutung definiert [Gl. (5.4)].

Treten in einem magnetischen Kreis jedoch mehrere magnetische Einzelleitwerte auf, so entfallen auf diese Leitwerte Teile der magnetischen Durchflutung, die jeweils als Ursache für den im Kreis vorhandenen Magnetfluß wirken.

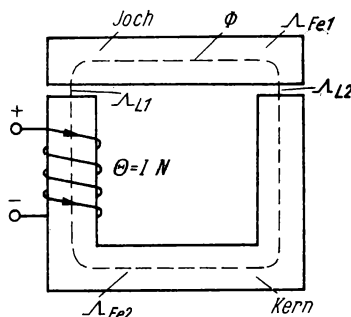


Bild 5.11
Magnetischer Kreis mit Luftspalten

Magnetische
Spannung

Für die einzelnen magnetischen Durchflutungen (magnetische Spannungsabfälle) gilt:

Formelzeichen

V

Physikalischer
Zusammenhang

$$\Lambda = \frac{\Phi}{V} \quad (5.5)$$

Einheit

[V] = 1 A

Magnetischer
Zweipol

Die magnetische Spannung V zwischen den Punkten 1 und 2 wird als magnetische Potentialdifferenz längs eines magnetischen Leitwertes Λ definiert.

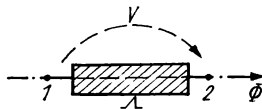


Bild 5.12
Zur Erläuterung der magnetischen Potentialdifferenz

Der magnetische Leitwert ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- von der Art des verwendeten Magnetmaterials,
- von der magnetisch wirksamen Länge,
- von der Größe des Flußquerschnitts.

Λ ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vorausbestimmbar ist.

Bemessung
magnetischer
Leitwerte

Der magnetische Leitwert wird um so größer,

- je kleiner die magnetisch wirksame Flußlinienlänge wird,
- je größer die magnetische Flußdurchtrittsfläche wird,
- je besser sich ein magnetisches Medium magnetisieren läßt.

Bemessungs-
gleichung

Es gilt für parallel-homogene Felder:

Physikalischer
Zusammenhang

$$\Lambda = \frac{A}{l} \mu \quad (5.6)$$

l magnetisch wirksame Länge in m,

A Flußdurchtrittsfläche in m^2 ,

μ magnetische Permeabilität in $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Magnetische
Permeabilität

Ist eine Materialkonstante, die die magnetische Durchlässigkeit kennzeichnet.

5.4.5. Magnetischer Widerstand

Magnetischer
Widerstand

Ist der reziproke Wert des magnetischen Leitwertes.

Formelzeichen

R_m

Physikalischer
Zusammenhang

$$R_m = \frac{1}{\Lambda} = \frac{l}{A \mu} \quad (5.7)$$

Einheit

$$\left[R_m \right] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}} = \frac{1}{1 \Omega \cdot 1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ S}}{\text{s}}$$

5.4.6. Magnetische Feldkonstante – Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Magnetflußdichte

Einfluß des
Materials

Im Zusammenhang von Feldstärkegröße und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß der verwendeten Materialien zum Ausdruck. Es gilt für ein bestimmtes Stück eines beliebigen magnetischen Kreises

$$R_m = R_m,$$

$$\frac{\Theta}{\Phi} = \frac{1}{\mu A},$$

$$\frac{I N}{\Phi} = \frac{1}{\mu A},$$

$$\frac{I N}{l} = \frac{\Phi}{\mu A}.$$

Physikalischer
Zusammenhang

$$B = \mu H \quad (5.8)$$

Die magnetische Permeabilität μ setzt sich aus einer Naturkonstanten μ_0 und einer Vergleichszahl μ_r (für das jeweilige Magnetmaterial) zusammen.

Magnetische
Feldkonstante
(absolute Permeabi-
litätskonstante des
leeren Raumes, In-
duktionskonstante)

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Relative
Permeabilität μ_r
(Permeabilitätszahl)

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

(5.9)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Die relative Permeabilität ist eine Vergleichszahl. Sie gibt an, wie-
vielmals besser (oder schlechter) als Vakuum sich ein Stoff magneti-
sieren läßt.

Magnetisierbarkeit
von Stoffen im
elektromagnetischen
Feld

Unter Magnetisierbarkeit versteht man die Aufbaumöglichkeiten für
das elektromagnetische Feld.

Tafel 5.1. Relative Permeabilität von Medien

Medium	μ_r	Einschätzung
Vakuum	1	-
Luft	≈ 1	schlecht magnetisierbar
Ferromagnetische Materialien	$\gg 1$ (10...10 000) nicht konstant	sehr gut magnetisierbar, verstärken magnetische Wirkungen
Paramagnetische Materialien	> 1 (ungefähr 1)	bedingt magnetisierbar
Diamagnetische Materialien	< 1 (ungefähr 1)	nicht magnetisierbar, vermindern magnetische Wirkungen

5.5. Magnetische Kreise

Begriffsbestimmung
„magnetischer
Kreis“

Ein magnetischer Kreis ist jede Verknüpfung von elektroma-
gnetischen Energiequellen mit mehr oder weniger gut magne-
tisierbaren Medien.

Es sind zu unterscheiden

- unverzweigte magnetische Kreise
(magnetische Maschen),
- verzweigte magnetische Kreise
(magnetische Verzweigungen).

5.5.1. Maschengesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen

Im unverzweigten magnetischen Kreis ist der magnetische Fluß
an allen Stellen gleich groß.

Er durchsetzt nacheinander die einzelnen magnetischen Teilwider-
stände. Dabei entstehen magnetische Spannungsabfälle.

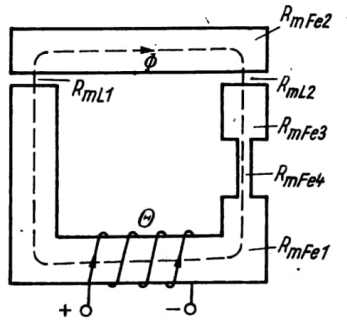


Bild 5.13
Zur Berechnung magnetischer Maschen

$$\Theta_{\text{ges}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

$$\Theta_{\text{ges}} = \Phi (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{mn})$$

Maschensatz des
magnetischen
Kreises

$$\Theta_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n V_k$$

(5.10)

$$\Theta_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n \Phi R_{mk}$$

Bei der Berechnung unverzweigter magnetischer Kreise wird die „magnetische Masche“ im Flußumlaufsinn durchlaufen.

In jedem unverzweigten magnetischen Kreis ist die Summe der magnetischen Spannungsabfälle gleich der magnetischen Gesamtdurchflutung.

5.5.2. Verzweigungsgesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen

Im verzweigten magnetischen Kreis ist die Summe der von der elektromagnetischen Quelle erzeugten Magnetflüsse gleich der Summe der auf die einzelnen magnetischen Kreise aufgeteilten.

$$\Phi_{ab1} + \Phi_{ab2} + \dots + \Phi_{abn} = \Phi_{zu1} + \Phi_{zu2} + \dots + \Phi_{zun}$$

Knotenpunktsatz

$$\sum_{k=1}^n \Phi_{abk} = \sum_{k=1}^n \Phi_{zuk}$$

(5.11)

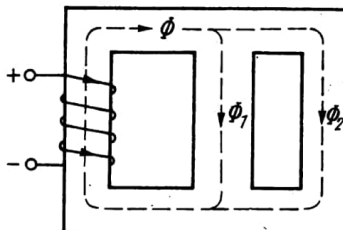


Bild 5.14
Zur Berechnung magnetischer Knotenpunkte

5.5.3. Durchflutungsgesetz

Aus dem Maschensatz des magnetischen Kreises

$$\Theta_{\text{ges}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

und $H = \frac{IN}{l}$ sowie $\Theta = IN$

kann entwickelt werden

$$IN = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n$$



$$\Theta_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n H_k l_k$$

(5.12)

Die Summe der magnetischen Spannungsabfälle entlang geschlossenen Feldlinien ist der Durchflutung der von ihnen umfaßten Fläche gleich.

Tafel 5. 2. Vergleiche zwischen dem elektrischen Stromkreis und dem elektromagnetischen Kreis

Elektrischer Kreis	Magnetischer Kreis
$E = U_i + U_a$	$\Theta = V_i + V_a$
$E = I (R_i + R_a)$	$\Theta = \Phi (R_{mi} + R_{ma})$
$I = I_1 + I_2$	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$
$I = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}$	$\Phi = \frac{\Theta}{R_{m1}} + \frac{\Theta}{R_{m2}}$

Ganz allgemein gilt:

Da $\Theta_{\text{ges}} = I N$ als ein Sonderfall anzusehen ist, in dem die Durchflutung von stromdurchflossenen Wicklungen hervorgerufen wird, kann auch geschrieben werden

Durchflutungsgesetz

$$\Theta_{\text{ges}} = \sum I$$

(5.13)

Mithin gilt

$$\sum I = \sum H l$$

Das bedeutet, daß die magnetische Durchflutung gleich der Stromsumme ist, die das Magnetfeld hervorruft und die die von Feldlinien eingeschlossene Fläche durchsetzt.

Hinweis

Vgl. auch Abschnitte 5.1., 5.3., 5.4.2.

5.6. Elektromagnetische Kreise mit verschiedenen Magnetmaterialien

Jedes Medium ist mehr oder weniger gut magnetisierbar (vgl. Abschnitt 5.4.6. und Tafel 5.1).

Ferromagnetika Weisen eine sehr gute Magnetisierbarkeit auf, z.B. Eisen, Nickel und Kobalt.

Paramagnetika Zeigen bei sehr hohen Feldstärken geringe Magnetisierungswirkungen, z.B. Aluminium, Uran und Zinn.

Diamagnetika Vermindern die magnetische Wirkung, z.B. Kupfer, Kohlenstoff, Antimon und Wismut.

5.6.1. Elektromagnetische Kreise mit Luft bzw. Vakuum als Magnetmedium

Nach der Beziehung

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

ist der funktionale Zusammenhang $B = f(H)$ für verschiedene Magnetmaterialien unterschiedlich, weil die relative Permeabilität eine materialabhängige Größe ist.

Nur für Vakuum, Luft, Paramagnetika und Diamagnetika ergeben sich Geraden.

Es gilt

$$\tan \alpha \hat{=} \frac{B}{H} = \text{konst.} \rightarrow \mu_r = 1 \text{ und } \mu_0 = \text{konst.}$$

Der funktionale Zusammenhang zwischen B und H wird als Magnetisierungskennlinie bezeichnet.

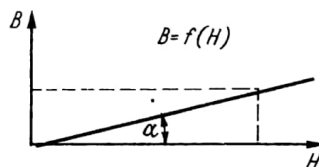


Bild 5.15
Magnetisierungskennlinie von Luft

5.6.2. Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika

Alle Elemente zeigen im inneren Aufbau atomare Magneten, die durch die Bewegung der Schalenelektronen um den Atomkern und um sich selbst (Elektronenspin) entstehen (Bewegung von Ladungen!). Die Achsen dieser Elementarmagneten werden durch elektromagnetische Felder ausgerichtet.

Besonderheiten von Ferromagnetika

Ferromagnetische Stoffe haben die Eigenschaft, daß die Achsen der Elementarmagneten innerhalb bestimmter Bereiche im Kristallgefüge (Weißsche Bezirke) schon eine Vorzugsrichtung ohne äußeres Magnetfeld aufweisen. Das beruht auf einer Unsymmetrie im Schalenaufbau der Atome von Ferromagnetika.

Magnetisierung

Durch elektromagnetische Felder werden die Weißschen Bezirke ausgerichtet. Damit erhöht sich die magnetische Flußdichte.

Sättigung

Bei einer bestimmten elektromagnetischen Feldstärke ist es nicht mehr möglich, noch weitere Weißsche Bezirke auszurichten, weil die überwiegende Anzahl dieser Bezirke schon in einer Richtung ausgerichtet wurde.

Deshalb kann bei weiterer Erhöhung der Feldstärke die Flußdichte nur noch unwesentlich vergrößert werden. Diese Erscheinung wird als Sättigung des Ferromagnetikums bezeichnet.

Remanenz

Nach Wegfall des Einflusses eines äußeren elektromagnetischen Feldes fallen nicht alle Weißschen Bezirke wieder in die vorherige „Unordnung“ zurück. Je nach Art des Ferromagnetikums verbleiben mehr oder weniger Weißsche Bezirke über einen längeren Zeitraum teil-

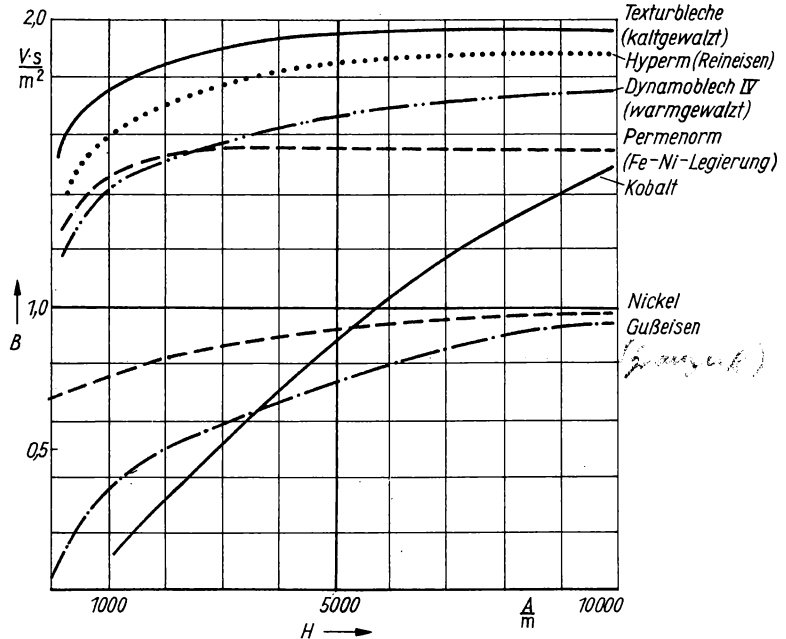


Bild 5.16. Magnetisierungskennlinien verschiedener Ferromagnetika (Mittelwerte)

weise ausgerichtet. Damit ist ein inneres Magnetfeld nachweisbar, das auch nach Aufhören des äußeren Magnetfeldes bestehenbleibt. Diese Erscheinung wird als Remanenz (Restmagnetismus) bezeichnet.

Der Sättigungspunkt für die verschiedenen Ferromagnetika liegt an der Stelle der Kennlinie, wo ein paralleler Verlauf zur Magnetisierungskennlinie von Luft erreicht wird.

Für die Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika gilt (Bild 5.16):

$$\tan \alpha \hat{=} \frac{B}{H} \neq \text{konst.} \rightarrow \mu_r \neq \text{konst. und } \mu_0 = \text{konst.}$$

μ_r von Ferromagnetika ist feldstärkeabhängig.

Hinweis

Vgl. „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

Magnetisierungskennlinien
von Stahlguß,
Dynamoblech und
Gußeisen

Geringe Feldstärken

$$H = 0 \dots 1500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

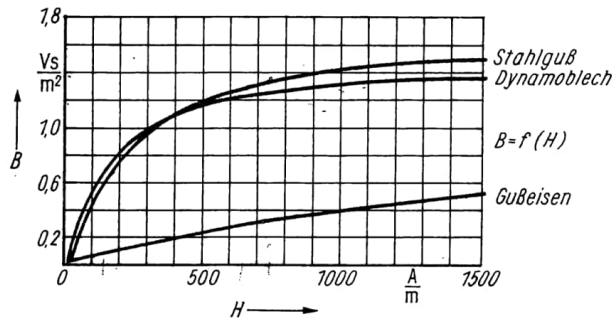


Bild 5.17. Magnetisierungskennlinien bei geringer Feldstärke

Mittlere Feldstärken

$$H = 2000 \dots 15000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

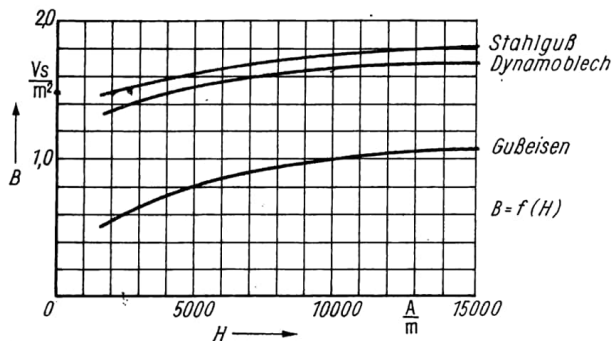


Bild 5.18. Magnetisierungskennlinien bei mittlerer Feldstärke

Große Feldstärken

$$H = 20\,000 \dots 150\,000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

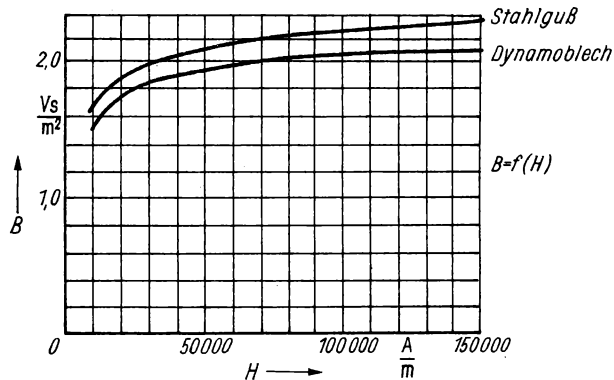


Bild 5.19. Magnetisierungskennlinien bei großer Feldstärke

5.6.3. Hystereseschleife – Entstehung und energetische Deutung

Entstehung der Hystereseschleife

Wird ein ferromagnetisches Material zunächst aufmagnetisiert und anschließend durch ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld entmagnetisiert und in dieser Richtung erneut magnetisiert, entsteht eine Hystereseschleife, wenn man den funktionalen Zusammenhang von B und H grafisch darstellt.

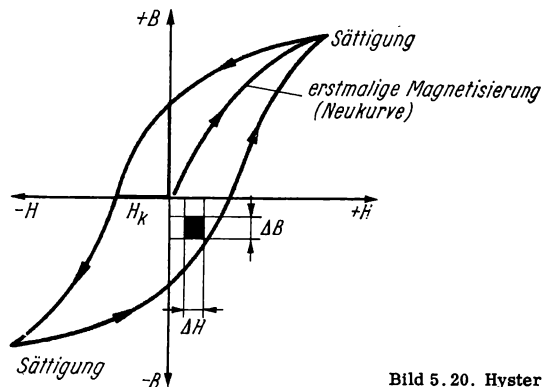


Bild 5.20. Hystereseschleife (allgemein)

Koerzitivfeldstärke

Die zur Beseitigung der Remanenz erforderliche Feldstärke ist die Koerzitivfeldstärke H_K .

Energieumsatz

Die von der Hystereseschleife (Bild 5.20) umfaßte Fläche kennzeichnet einen Energieumsatz.

Eine bestimmte Fläche ΔA der Hystereseschleife kann nach $\Delta A = \Delta H \Delta B$ berechnet werden. Eine exakte Berechnung der gesamten Fläche kann mit Hilfe der höheren Mathematik erfolgen. Aus den Einheiten von H und B entsteht

$$[H] \quad [B] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^3}.$$

Damit ist gezeigt, daß beim Ummagnetisieren von Ferromagnetika ein Energieumsatz stattfindet. Dieser ist volumenabhängig.

Ummagnetisierungs-
verluste

Harte Ferromagnetika

Die Hystereseschleife umschließt eine große Fläche. Zum Ummagnetisieren sind große Energien erforderlich.

Weiche Ferromagnetika

Die Hystereseschleife umschließt eine kleine Fläche. Die Ummagnetisierungsenergie ist gering.

Ferromagnetika
für elektrische
Maschinen

Als Kernwerkstoffe für Transformatoren, Motoren oder Relais werden weiche Ferromagnetika eingesetzt, um möglichst wenig Verluste durch Ummagnetisierung zu erhalten. Die Größen H und B ändern häufig ihre Richtung.

5.7. Permanentmagnetismus als Sonderform des Elektromagnetismus

Im Abschn. 5.6.2. wurde gezeigt, daß Ferromagnetika auf Grund bestimmter Unsymmetrien im Atomaufbau besondere magnetische Eigenschaften aufweisen.

Werkstoffe für
Permanent-
magneten

Magnetisch harte Werkstoffe, bei denen schon viele Weißsche Bezirke in einer Vorzugsrichtung ausgerichtet sind, eignen sich besonders für die Herstellung von Permanentmagneten [permanere (lat.) = fortlaufend bestehen].

Aufmagnetisierung

Ist möglich durch

- Einbringen von Stahl in das Gleichfeld einer stromdurchflossenen Spule,
- Bestreichen von Stahl mit anderen Dauermagneten.

Die elastische Verformung der inneren Struktur (Ausrichten der Elementarmagneten) wird als Magnetostriktion bezeichnet.

Entmagnetisierung

Kann erfolgen durch

- fortlaufende starke Erschütterungen,
- Ausglühen,
- Einbringen in ein zusammenbrechendes Wechsellagnetfeld einer Spule.

Hinweis

Neuere Technologien zur Herstellung hochwirksamer Permanentmagneten sind durch die Pulvermetallurgie (Sinterverfahren) möglich.

Tafel 5.3. Vergleichende Betrachtung der Felder in der Elektrotechnik

	Elektrisches Strömungsfeld	Elektrostatisches Feld	Elektromagnetisches Feld
Charakterisierung des Feldes	Raumzustand der Materie	Raumzustand der Materie	Raumzustand der Materie
Energieinhalt und -form	elektrische Energie elektrische Strömungsenergie kinetische elektrische Energie	dielektrische Energie statische elektrische Energie potentielle elektrische Energie	elektromagnetische Energie potentielle Energie
Gesamtursachengrößen	E elektrische Ursprungung	U elektrische Spannung	Θ magnetische Durchflutung
Spannungsabfälle	U elektrischer Spannungsabfall	U elektrischer Spannungsabfall	V magnetischer Spannungsabfall
Feldstärkegrößen	$E = \frac{U}{l}$ elektrische Feldstärke	$E = \frac{U}{l}$ elektrische Feldstärke	$H = \frac{\Theta}{l}$ magnetische Feldstärke
Wirkungsgrößen	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ elektrische Stromstärke	$\psi = Q$ elektrischer Verschiebungsfluß (Ladung)	Φ magnetischer Fluß
Dichte Größen	$S = \frac{\Delta I}{\Delta A}$ elektrische Stromdichte	$D = \frac{\Delta \psi}{\Delta A}$ Verschiebungsflußdichte	$B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$ magnetische Flußdichte
Vermittlungs- (Bedingungs-) Größen	$R = \frac{U}{I}$ elektrischer Widerstand	-	$R_m = \frac{V}{\Phi}$ magnetischer Widerstand
Leitwertgrößen	$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ elektrischer Leitwert	$C = \frac{\psi}{U} = \frac{Q}{U}$ Kapazität (allgemein)	$\Lambda = \frac{\Phi}{\Theta}$ magnetischer Leitwert (allg.)
Materialgrößen	ρ spezifischer elektrischer Widerstand	-	-
	κ elektrische Leitfähigkeit	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$ absolute Dielektrizitätskonstante	$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ absolute Permeabilitätskonstante
	-	ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante	μ_r relative Permeabilitätskonstante
	-	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$	$\mu = \mu_0 \mu_r$
Beziehungen zwischen Dichte Größen und Feldstärkegrößen	$S = \kappa E$	$D = \epsilon E$	$B = \mu H$

5.8. Elektromagnetische Induktion

Wesen

- Zeitliche Änderungen elektromagnetischer Felder um elektrische Leiter
oder
- relative Bewegungen (Lageveränderungen) elektrischer Leiter in stationären elektromagnetischen Feldern rufen im Leiter elektrische Ursprungen hervor.

Diese Erscheinungen bezeichnet man als Induktion (erstmalig angegeben 1831 von Faraday).

5.8.1. Allgemeines Induktionsgesetz

Allgemeines
Induktionsgesetz

$$|E| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (5.14)$$

Energiewandlung
magnetisch/
elektrisch

In einem elektrischen Leiter entsteht dann eine elektrische Urspannung, wenn und solange sich im Leiter oder um den Leiter der magnetische Fluß zeitlich ändert.

Hinweis

Es handelt sich hierbei um die Umkehrung des im Abschn. 5.3. gezeigten Prinzips.

Grundformen
der Induktion

Das allgemeine Induktionsgesetz gilt für

- Ruheinduktion – ruhender elektrischer Leiter, zeitlich veränderliches Magnetfeld;
- Bewegungsinduktion – bewegter elektrischer Leiter, stationäres Magnetfeld.

Richtung der
Induktionsspannung

Jede Spannung ist richtungsbehaftet (vgl. Abschn. 3.3.2.1.). Die Richtung einer Induktionsspannung muß festgelegt werden.

Nach dem Energieerhaltungsgesetz kann eine Energieform nur dadurch in eine andere übergeführt werden, daß sich der Betrag der vorhandenen verringert.

Der in einem geschlossenen leitfähigen Kreis fließende Strom wird von einer Urspannung gleicher Richtung angetrieben. Der durch Induktion hervorgerufene Strom und die ihn antreibende Urspannung müssen so gerichtet sein, daß sie die stromerzeugende Ursache zu hemmen versuchen. Beim Vergleich mit den Richtungsfestlegungen im Abschn. 5.3.1. (Rechtsschraube), die auf der positiv definierten Zählrichtung beruhen, ist erkennbar, daß die Induktionsspannung negativ gerichtet sein muß.

$$-E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (5.15)$$

Lenzsches Gesetz
(Heinrich Friedrich
Emil Lenz,
1804–1865,
russischer Physiker)

Eine durch Induktion hervorgerufene Urspannung treibt stets einen so gerichteten Induktionsstrom an, daß dessen Magnetfeld der Entstehungsursache entgegenwirkt.

Hinweis

Eine positiv gerichtete Induktionsurspannung wird durch eine Flußabnahme, eine negativ gerichtete Induktionsurspannung durch Flußzunahme hervorgerufen.

Ruheinduktion

Wird eine Spule mit N Windungen von einem veränderlichen Magnetfluß durchsetzt, entstehen in den Einzelwindungen Induktionsurspannungen, die sich zur Gesamturspannung addieren.

Für jede beliebige Spule, in der Induktion auftritt, gilt

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (5.16)$$

Jede Spule, in der eine Induktion stattfindet, wirkt als Spannungserzeuger.

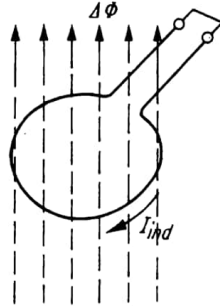


Bild 5.21
Vom Magnetfeld durchsetzte
Leiterschleife

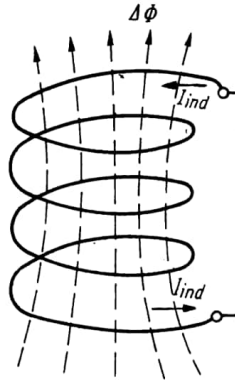


Bild 5.22. Vom Magnetfeld durchsetzte Spule

Höhe der Ursprungung Ist abhängig

- von der Anzahl der Windungen N ,
- von der Größe der Flußänderungsgeschwindigkeit $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

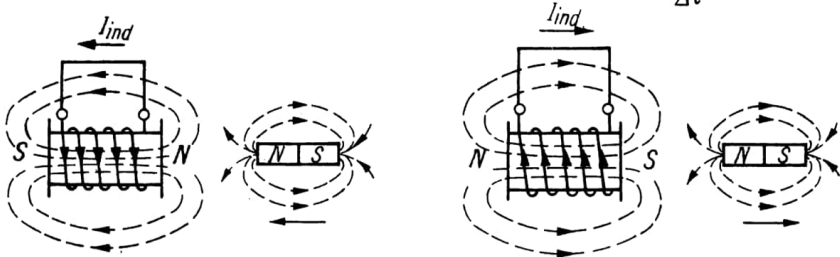


Bild 5.23. Zur Induktion durch Magnetflußänderung

Bewegungsinduktion

Eine zeitliche Änderung des Magnetflusses kann durch Bewegung von Magneten, aber auch durch Bewegung des elektrischen Leiters in einem konstanten Magnetfeld erreicht werden.

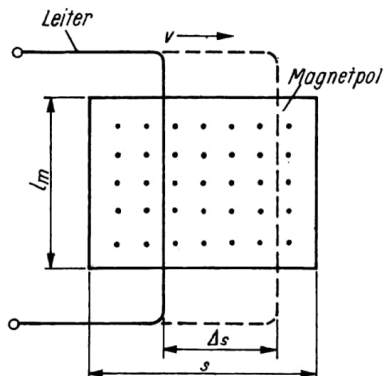


Bild 5.24
Bewegung eines Leiters im Magnetfeld
 l_m magnetisch wirksame Länge; s Polkantenlänge; v Geschwindigkeit der Leiterbewegung; s zurückgelegter Weg der Leiterschleife

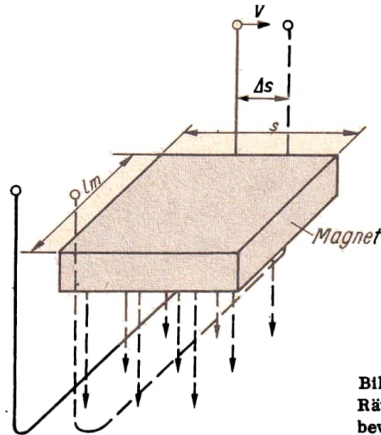


Bild 5.25
Räumliche Darstellung einer Leiterbewegung im Magnetfeld

Generatorprinzip

Wird ein elektrischer Leiter senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld bewegt, ist die vom Leiter überstrichene Flußdurchsetzungsfläche

$$\Delta A = l_m \Delta s.$$

Nach $B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$ ergibt sich

$$\Delta \Phi = B l_m \Delta s.$$

Mit Gl. (5.15) entsteht durch Einsetzen

$$E = - \frac{B l_m \Delta s}{\Delta t}.$$

Weil $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, gilt

$$|E| = B l_m v. \quad (5.17)$$

Die Induktionsurspannung eines im Magnetfeld bewegten Leiters ist von

- der Magnetflußdichte des Magnetfeldes,
- der magnetisch wirksamen Länge des Magnetfeldes (bzw. des Leiters),
- der Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters abhängig.

Spule im Magnetfeld

Werden mehrere in Reihe geschaltete Leiter (Spulen) im Magnetfeld bewegt, so gilt

$$|E| = N B l_m v. \quad (5.18)$$

Stromrichtung

Es wurde vereinbart

Rechte-Hand-Regel (Generatorregel).

Hält man die rechte Hand so in ein Magnetfeld, daß die Feldlinien in den offenen Handteller eintreten und der abgespreizte Daumen in Bewegungsrichtung des Leiters zeigt, dann zeigen die ausgestreckten

vier Finger in Richtung des durch die induzierte Urspannung angetriebenen Stromes in der Leiterschleife.

Hinweis

Auf den gleichen Grundlagen beruht die U(rsache)-V(ermittlungs)-W(irkungs)-Regel.

Die Regel ist jeweils für eine Hälfte der Leiterschleife anzuwenden (vgl. Bild 5.26).

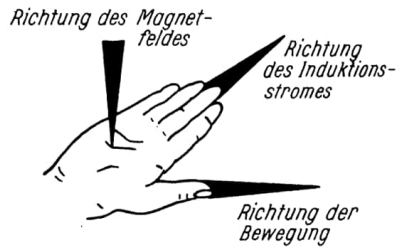


Bild 5.26
Rechte-Hand-Regel
(Generatorregel)

Die Bewegung von Leitern kann kreisförmig erfolgen. Das ist das Grundprinzip aller rotierenden elektrischen Maschinen (vgl. Bild 5.27).

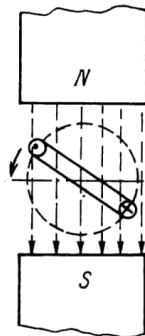


Bild 5.27
Drehbewegung einer Leiterschleife im homogenen Magnetfeld

Aus der Beziehung

$$|E| = \left[N \right] \cdot \left[\frac{\Phi}{A} \right] \cdot \left[l_m \right] \cdot \left[\pi \right] \cdot \left[d \right] \cdot n$$

ergibt sich, daß für einen bestimmten Generator auch bestimmte konstruktive Größen vorhanden sind.

Deshalb gilt allgemein für jeden Generator

Allgemeine
Generatorgleichung

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n; \quad (5.18a)$$

C_1 Maschinenkonstante (abhängig von der Konstruktion),
 n Umlauffrequenz der Leiterschleife.

5.8.2. Gegeninduktion

Erscheinung

Wird in einer Leiterschleife (Spule) N_1 ein veränderlicher Magnetfluß erzeugt, der eine zweite magnetisch gekoppelte Leiterschleife (Spule) N_2 durchsetzt, so entsteht in dieser eine Urspannung durch Gegeninduktion (Bild 5.28).

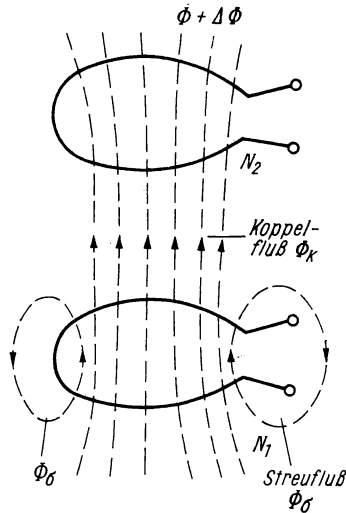


Bild 5.28

Magnetisch gekoppelte Leiterschleife (Spulen)

Koppelfluß Φ_k

Ist der beide Spulen durchsetzende Magnetfluß.

Streufluß Φ_σ

Ist der außerhalb der Spulen vorhandene, aber von den Spulen erzeugte Magnetfluß.

Der Koppelfluß muß so groß wie möglich gemacht werden. Das kann mittels magnetisch gut leitfähiger Materialien realisiert werden.

Transformatorprinzip

Energiewandlung
elektrisch \longrightarrow magnetisch \longrightarrow elektrisch

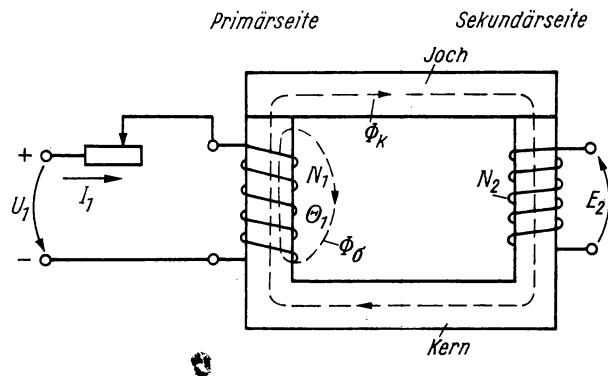


Bild 5.29. Prinzip des Transformators

Sekundär-
urspannung

Es gilt

- Strom in Spule N_1 ändert sich

$$\Delta I_1 \longrightarrow \Delta \theta_1 \longrightarrow \Delta \Phi_1 \longrightarrow -E_2.$$

In Spule N_2 entsteht dann eine Urspannung, wenn und solange sich der diese Spule durchsetzende Koppelfluß zeitlich ändert.

- Strom in Spule N_1 bleibt konstant

$$I_1 \longrightarrow \theta \longrightarrow \Phi_1 \longrightarrow -E_2 = 0.$$

Eine Änderung des Primärstromes I_1 kann erreicht werden durch

- Einschalt- und Ausschaltvorgänge an der Primärspule,
- Spannungsänderung an der Primärspule,
- Speisung der Primärspule mit periodisch veränderlicher Spannung.

Der magnetische Fluß der Primärspule ist

$$\Phi_1 = \Phi_k + \Phi_0.$$

Nicht der gesamte Primärmagnetfluß Φ_1 durchsetzt die Sekundärspule als Sekundärmagnetfluß Φ_2 .

Es wird definiert

Kopplung von
Primär- und
Sekundärspulen

Kopplungsgrad

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}.$$

(5.19)

Man unterscheidet zwischen

- fester Kopplung $k \approx 1$,
- loser Kopplung $k \ll 1$.

Berechnung der
Gegeninduktions-
urspannung

Es muß gelten

$$E_2 = - \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} N_2 \quad [\text{vgl. Gl. (5.16)}],$$

$$E_2 = - \frac{\Delta \Phi_1 k}{\Delta t} N_2,$$

$$E_2 = - \frac{\Delta \theta k}{\Delta t R_m} N_2,$$

$$E_2 = - \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \cdot \frac{N_1 N_2 k}{R_m}. \quad (5.20)$$

Mit $M = \frac{N_1 N_2 k}{R_m}$ entsteht

$$E_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}. \quad (5.21)$$

Gegeninduktivität M Wird auch als Beiwert der Gegeninduktion bezeichnet. M ist eine konstruktive Größe.

$$\text{Einheit } [M] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H (vgl. Abschn. 5.4.5.)}$$

Die Gegeninduktivität ist eine Leitwertgröße.

5.8.3. Selbstinduktion

Erscheinung

Eine Selbstinduktion tritt dann auf, wenn und solange sich der ein und dieselbe Spule durchfließende Strom zeitlich ändert.

In den Windungen einer Spule werden Urspannungen induziert, die nach dem Lenzschen Gesetz der erzeugenden Ursache entgegenwirken.

Berechnung

$$E = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad [\text{vgl. Gl. (5.16)}].$$

$$E = - \frac{N}{R_m} \frac{\Delta \Theta}{\Delta t},$$

$$\downarrow$$

$$E = - \frac{N}{R_m} \frac{\Delta I}{\Delta t} N,$$

$$\downarrow$$

$$E = - \frac{N^2}{R_m} \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (5.22)$$

$$\text{Mit } L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \Lambda \text{ entsteht}$$

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (5.23)$$

Selbstinduktivität L

Wird auch als Beiwert der Selbstinduktion bezeichnet. L ist eine konstruktive Größe.

$$\text{Einheit } [L] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H (vgl. Abschn. 5.4.5.)}$$

Die Selbstinduktivität ist eine Leitwertgröße.

Zusammenhang
zwischen Gegen-
induktivität und
Selbstinduktivität

Aus Gln. (5.20) bis (5.23) gelten

$$M = \frac{N_1 N_2 k}{R_m} \quad \text{und} \quad L = \frac{N^2}{R_m},$$

$$\downarrow$$

$$M = \frac{N_1}{\sqrt{R_m}} \frac{N_2}{\sqrt{R_m}} k.$$

Durch mathematische Verknüpfung ergibt sich

$$M = \sqrt{L_1} \sqrt{L_2} k ,$$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} .$$

(5.24)

Die Gegeninduktivität zweier magnetisch gekoppelter Spulen ist gleich dem mit dem Kopplungsgrad multiplizierten geometrischen Mittel der Einzelselbstinduktivitäten.

Verminderung der Selbstinduktion

Durch induktivitätsarme Wicklungen möglich (Beispiele s. Bilder 5.30 und 5.31).

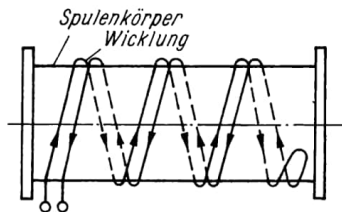


Bild 5.30

Bifilare Wicklung (Doppeldrahtwicklung)

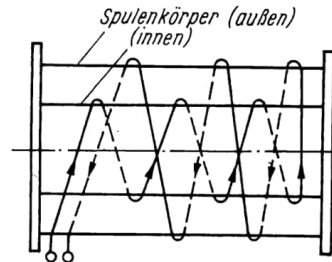
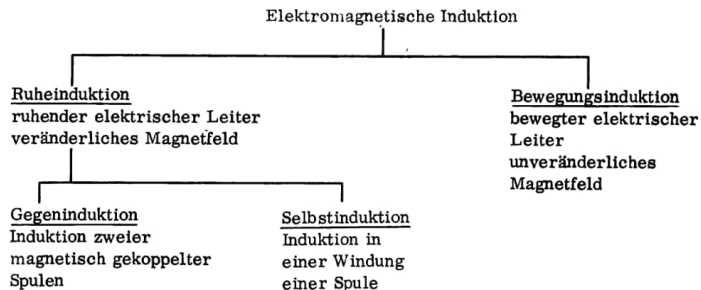


Bild 5.31

Chaperon-Wicklung

Tafel 5.4. Induktionserscheinungen



5.8.4. Wirbelstrombildung

Durch Bewegungsinduktion

Werden Metallmassen in Magnetfeldern bewegt, entstehen durch Induktion Urspannungen im Metall, die hohe Ströme (Kurzschlußkreise) antreiben können (rotierende elektrische Maschinen). Wegen ihres scheinbar regellosen Verlaufs im Metall werden sie als Wirbelströme bezeichnet.

Durch Ruheinduktion

Die gleiche Wirkung tritt ein, wenn sich in oder um Metallmassen der magnetische Fluß zeitlich ändert (ruhende elektrische Maschinen).

Wirbelstromverluste

Wirbelströme verursachen wegen ihres Kurzschlußcharakters

- starke Erwärmung,
- hohe Magnetfelder, die nach dem Lenzschen Gesetz der Ursache ihrer Entstehung (z. B. der Bewegung) entgegenwirken.

Verminderung von Wirbelströmen

Wirbelströme sind in der technischen Praxis unerwünscht.

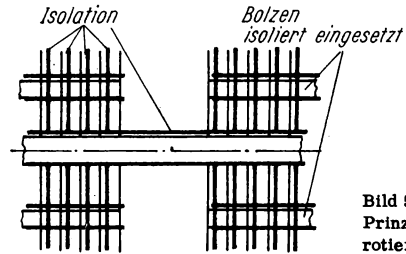


Bild 5.32
Prinzip des Blechpakets einer
rotierenden elektrischen Maschine

Sie können vermindert werden durch

- Unterteilung geschlossener Metallmassen – Paketierung (Aufbau von geschichteten Blechpaketen, Bild 5.32);
- Isolation von Einzelblechen im Blechpaket gegeneinander (Bild 5.33) durch
Papierzwischenlagen,
Lackierung,
Oxidschichten;
- Verminderung der elektrischen Leitfähigkeit unter Beibehaltung magnetischer Eigenschaften – Einlegierung von Halbleitermaterialien (z.B. Silizium in Dynamo- und Transformatorenblechen).

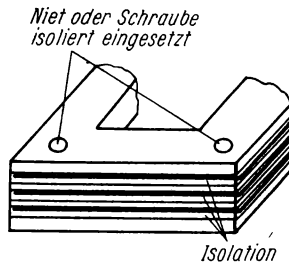


Bild 5.33
Prinzip eines geschichteten Kerns einer
ruhenden elektrischen Maschine

Anwendung der Wirkung von Wirbelströmen

Die Wirbelstrombildung wird technisch genutzt: Bremswirkung des Wirbelstrommagnetfeldes (Bild 5.34)

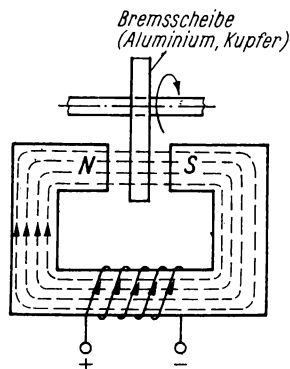


Bild 5.34
Prinzip einer Wirbelstrombremse

- Verkehrsmittel (z. B. Straßenbahn, Ablaufberge),
- elektrische Meßwerke (z. B. Ausschlagdämpfung),
- Abbremsung elektrischer Maschinen.

5.8.5. Spule und elektromagnetisches Feld

5.8.5.1. Induktivität von Spulen

Bedingungsgröße des elektromagnetischen Feldes Wie im elektrischen Strömungsfeld und im elektrostatischen Feld wird im elektromagnetischen Feld definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Eigenschaft Induktivität Im elektromagnetischen Feld wird die Induktivität einer Spule mit N Windungen als Bedingungsgröße eingeführt.

Formelzeichen L

Physikalischer Zusammenhang $L = (N) \frac{\Phi}{I}$ (5.25)

Einheit Henry
 $[L] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H}$

- Weitere gesetzliche Einheiten:
 $1 \text{ mH} = 1 \text{ Millihenry} = 10^{-3} \text{ H}$
 $1 \mu\text{H} = 1 \text{ Mikrohenry} = 10^{-6} \text{ H}$

Energiespeicherung Die Induktivität L gibt Auskunft darüber, wie groß die Speicherkapazität einer stromdurchflossenen Spule für elektromagnetische Energie ist.
 Die Induktivität entspricht einer Leitwertgröße (vgl. Abschnitte 3.4.1.1. und 5.8.4.).

Bemessungs-
gleichung Aus den Abschnitten 5.4.4., 5.4.5. und 5.8.5.1. ergibt sich
 $L = L$

$$L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \Lambda \qquad L = N \frac{\Phi}{I}$$

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \qquad L = \frac{N I N \mu A}{l I}$$

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l} \qquad L = N^2 \frac{\mu A}{l}$$

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r A}{l} \qquad (5.26)$$

Gültigkeitsbedingung: lange Zylinderspule

$$l \gg d$$

l magnetisch wirksame Länge
 d Spulendurchmesser

Die Induktivität von Spulen ist als konstruktive Größe vorausbestimmbar.

Ist Eisen im Magnetkreis vorhanden, ist die Induktivität nicht ohne weiteres konstant, sondern von der jeweiligen Magnetisierung abhängig (vgl. Abschnitte 5.6.1. und 5.6.2.).

5.8.5.2. Zusammenschaltung von Spulen

Wie alle Zweipole können Spulen mit anderen zusammenschaltet werden.

Arten der
Zusammenschaltung

- Reihenschaltung von Spulen
- Parallelschaltung von Spulen

Ersatzinduktivität

Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens einer Zusammenschaltung von mehreren Spulen wird die Ersatzinduktivität L_{ers} gebildet.

Die Ersatzinduktivität ist die wirksame Gesamtinduktivität einer Spulenzusammenschaltung.

Reihenschaltung

Beim Durchfluß eines unveränderlichen Stromes entsteht über einer idealen Spule kein Spannungsabfall. Bei einer Spule wirkt die induzierte Selbstinduktionsurspannung E der stromerzeugenden Ursache, also der Spulenklemmenspannung entgegen.

Es gilt, wenn keine anderen Verluste auftreten,

$$U_L = -E_s \quad (5.27)$$



$$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{vgl. Gl. (5.23)}].$$

$$U_1 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U_2 = L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} \longrightarrow U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$\vdots$$

$$U_n = L_n \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta t} = \frac{\Delta I_2}{\Delta t} = \frac{\Delta I_n}{\Delta t} = \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$L_{\text{ers}} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \sum_{k=1}^n L_k \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

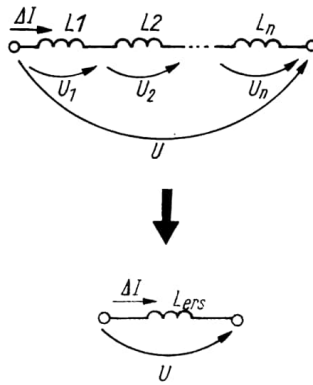


Bild 5.35
Ersatzinduktivität einer Reihenschaltung

Ersatzinduktivität

$$L_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n L_k \quad (5.28)$$

Die Ersatzinduktivität L_{ers} einer Reihenschaltung von Spulen setzt sich aus den Einzelinduktivitäten zusammen.

Hinweis

Die Einzelspulen dürfen magnetisch nicht gekoppelt sein, da sich sonst Veränderungen der magnetisch wirksamen Länge ergeben.

Bei Reihenschaltung magnetisch nicht gekoppelter Spulen ist die Ersatzinduktivität stets größer als die größte Teilinduktivität.

Ersatzinduktivität
von n Spulen
gleicher Induktivität

$$L_{\text{ers}} = n L_n \quad (5.29)$$

Parallelschaltung

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta t} = \frac{U_{L1}}{L_1}$$

$$\frac{\Delta I_2}{\Delta t} = \frac{U_{L2}}{L_2} \longrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I_1}{\Delta t} + \frac{\Delta I_2}{\Delta t} + \dots + \frac{\Delta I_n}{\Delta t}$$

⋮

$$\frac{\Delta I_n}{\Delta t} = \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$U = U_{L1} = U_{L2} = U_{Ln}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{L1}}{L_1} + \frac{U_{L2}}{L_2} + \dots + \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$\frac{U}{L_{\text{ers}}} = \frac{U_{L1}}{L_1} + \frac{U_{L2}}{L_2} + \dots + \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

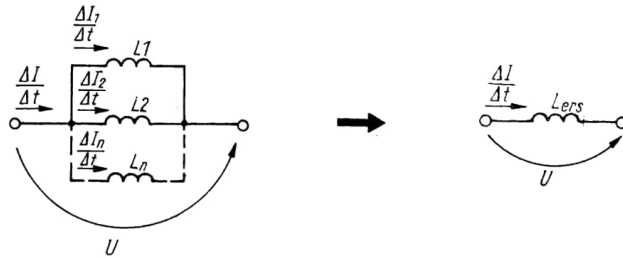


Bild 5.36
Ersatzinduktivität einer Parallelschaltung

Ersatzinduktivität

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad (5.30)$$

Bei Parallelschaltung magnetisch nicht gekoppelter Spulen ist die Ersatzinduktivität stets kleiner als die kleinste Einzelinduktivität.

Ersatzinduktivität
von n Spulen
gleicher Induktivität

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \frac{n}{L_n}$$

$$L_{\text{ers}} = \frac{L_n}{n}$$

(5.31)

Ersatzinduktivität
zweier Spulen

$$L_{\text{ers}} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (5.32)$$

Hinweis

Die Einzelspulen dürfen magnetisch nicht gekoppelt sein, da sich sonst Veränderungen des wirksamen Flußquerschnitts ergeben.

5.8.5.3. Erwünschte und unerwünschte Spulenanordnungen

Elektrotechnisches
Grundbauelement
Spule
Erwünschte
Spulenanordnung

Die Spule ist das Bauelement, das als technisches Objekt auf den Gesetzmäßigkeiten des elektromagnetischen Feldes beruht. Sie ist wie der Widerstand und der Kondensator ein Grundbauelement der Elektrotechnik.

An Spulen werden technisch notwendige Forderungen gestellt:

- Größe und Konstanz der Induktivität,
- Variation der Induktivität,
- Strombelastbarkeit,
- Bauform je nach Einsatzzweck.

Diese konstruktiven Eigenschaften bestimmen die Einsatzmöglichkeiten von Spulen.

Konstruktive
Besonderheiten

Siehe Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

Unerwünschte Spulenanordnung

Aus der Definition einer Induktivität geht hervor, daß jeder beliebige stromdurchflossene Leiter eine Induktivität aufweist. In elektrischen Schaltungen und Anlagen treten unerwünschte Induktivitäten auf

- bei langen, stromdurchflossenen elektrischen Leitungen,
- an stromdurchflossenen Anschlüssen elektronischer Bauelemente,
- zwischen stromdurchflossenen Leitungen.

Besonders in Schaltungen der Hochfrequenztechnik können derartige Störinduktivitäten nicht mehr vernachlässigt werden.

5.8.5.4. Verlustlose und verlustbehaftete Spulen

Verlustlose Spulen

Verlustlose Spulen sind idealisierte Spulen. Sie dienen zur besseren theoretischen Erfassung von bestimmten Eigenschaften. Solche Spulen sind technisch nicht realisierbar, da jeder elektrische Leiter einen bestimmten Widerstand hat, der außer magnetischen Wirkungen auch Wärmewirkungen zeigt.

Hinweis

Vgl. Abschnitte 3.3.1.2. und 3.4.2.

Verlustbehaftete Spulen

Alle technischen Spulen sind verlustbehaftet (reale Spulen).

Verluste

Bei einer Spule treten auf:

- Erwärmungsverluste („Kupfer"verluste),
- Wirbelstromverluste (Erwärmung des Eisenkerns),
- Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste),
- bei hohen Frequenzen (zwischen den Wicklungen) kapazitive Verluste.

Die bei technischen Spulen auftretenden Erwärmungsverluste werden in einem Verlustwiderstand R_{Cu} , die kapazitiven Verluste in einem Verlustkondensator C_v dargestellt.

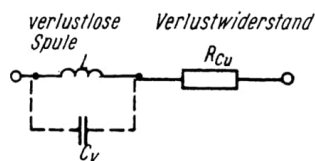


Bild 5.37
Ersatzschaltplan einer verlustbehafteten
Spule

Hinweis

Die im Eisenkern von technischen Spulen auftretenden Wärmeverluste können in einem parallel zur Spule liegenden Widerstand R_{Fe} dargestellt werden.

5.9. Verhalten von Spulen bei verschiedenen Betriebsarten

5.9.1. Spule an unveränderlicher Gleichspannung

Eine ideale Spule ist ein absoluter Leiter. Zwischen Wicklungsanfang und -ende fließt ein unendlich hoher Strom, weil der Drahtwiderstand der Wicklung Null ist. Damit ist auch der Spannungsabfall Null. Es findet eine Umwandlung elektrischer Energie in elektromagnetische Energie statt.

Die ideale Spule wirkt als Speicher elektromagnetischer Energie.

Es tritt keine Energie aus dem Kreis heraus.

Hinweis

Einschalt- und Ausschaltvorgänge werden hier vernachlässigt.

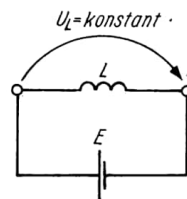


Bild 5.38. Spule an unveränderlicher Gleichspannung

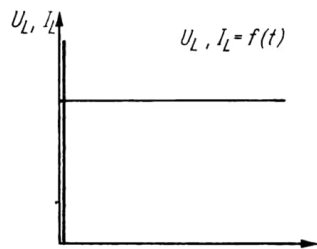


Bild 5.39 Strom- und Spannungsverlauf bei unveränderlicher Gleichspannung

5.9.2. Spule an veränderlicher Gleichspannung

Nach den Gln. (5.23) und (5.27) ergibt sich:

Über einer Spule entsteht nur dann Spannung, wenn und solange sich der die Spule durchfließende Strom zeitlich ändert.

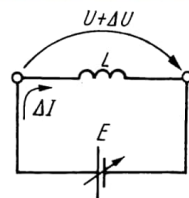


Bild 5.40. Spule an veränderlicher Gleichspannung

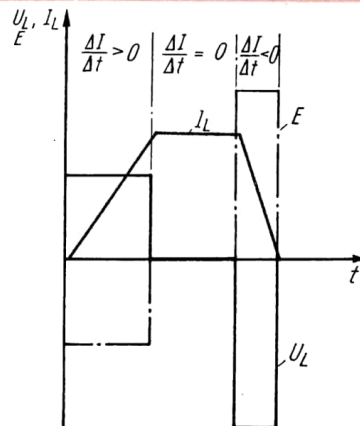


Bild 5.41 Strom- und Spannungsverlauf bei veränderlichem Strom

Die über der Spule liegende Spannung U_L und die in der Spule induzierte Ursprungspannung E sind bei einer idealen Spule entgegengesetzt gleich groß.

$$U_L; E \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Die Spannung über der Spule ist um so größer, je größer die Stromänderungsgeschwindigkeit ist.

Ein Strom in positiver Richtung kann nur durch eine positiv gerichtete Klemmenspannung an der Spule hervorgerufen werden.

Die Selbstinduktionsursprungspannung versucht, nach dem Lenzschen Gesetz, diesen Vorgang zu verhindern.

5.9.3. Verhalten von Spulen bei Schaltvorgängen

Vgl. hierzu Abschn. 4.9.3.1.

Es werden die gleichen grundsätzlichen Ansätze verwendet.

Eine Spule mit der Induktivität L wird zum Zeitpunkt $t = t_{\text{ein}}$ mit dem Umschalter S über einen Widerstand R_1 an eine Gleichspannung U_N angeschlossen. Die aufmagnetisierte Spule kann über R_2 abgeschaltet werden (Bild 5.42). Dabei kann R_2 auch einen Kurzschluß darstellen.

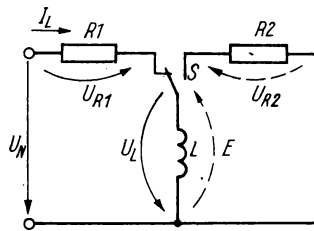


Bild 5.42
Prinzipschaltung für das Ein- und Ausschalten einer Spule

Hinweis

Für die allgemeine Betrachtung wird eine ideale Spule mit einem Drahtwiderstand $R = 0$ angenommen (vgl. Abschn. 5.8.5.4.).

Strom einer Spule
beim Einschalten
und nach dem Ein-
schalten

Sprunghafte Änderungen des Stromes in einer Spule sind nicht möglich, weil die Selbstinduktion jeder Veränderung des Stromes entgegenwirkt.

Da die Spannung über der Spule erst schnell und dann immer lang-

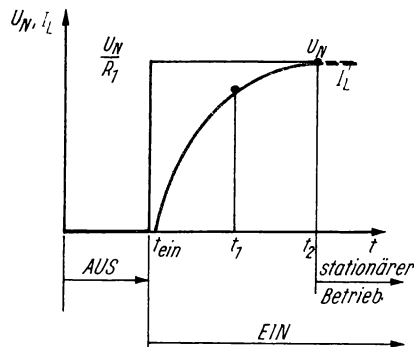


Bild 5.43
Einschaltvorgang an einer Spule

samer sinkt, muß der Strom erst schnell, dann langsamer ansteigen. Das erfolgt, bis keine Spannung mehr an der Spule anliegt. Für das Zeitverhalten des Stromes gilt

$$I_L = \frac{U_N}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t R}{L}} \right) = \frac{U_N}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t R}{L}} \right) \quad (5.33)$$

Der Strom in einer Spule, die auf ein Netz geschaltet wird, steigt zeitlich verzögert an.

Strom einer Spule
beim Ausschalten
und nach dem
Ausschalten

Dem Ausschalten des Stromes in einer Spule wirkt die Selbstinduktion entgegen, so daß auch nach dem Ausschalten der Netzspannung noch Strom fließen kann. Die Selbstinduktionsspannung wirkt dem Abschalten entgegen.

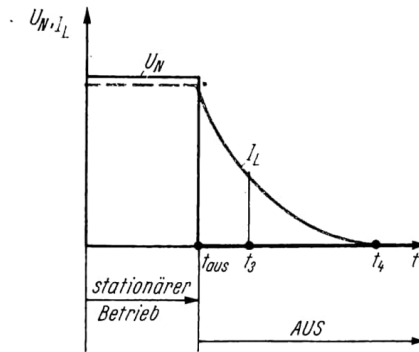


Bild 5.44
Ausschaltvorgang an einer Spule

Für das Zeitverhalten des Stromes gilt

$$I_L = \frac{U_N}{R_2} e^{-\frac{t R}{L}} \quad (5.34)$$

Der Strom in einer Spule, die vom Netz getrennt wird, fällt zeitlich verzögert ab.

Spannung einer Spule
beim Einschalten
und nach dem
Einschalten

Bei jedem Schaltvorgang ändert sich der die Spule durchfließende Strom. Es tritt deshalb stets die Selbstinduktion auf. Die Spule wirkt beim Einschalten als Verbraucher. Dem Kreis wird die zum Aufbau des magnetischen Feldes benötigte Energie entzogen.

Für den zeitlichen Verlauf der Spannung gilt

$$U_L = \frac{U_N}{e^{\frac{t R}{L}}} = U_N e^{-\frac{t R}{L}} \quad (5.35)$$

Eine Spule, die auf eine Spannungsquelle geschaltet wird, wirkt wie ein Verbraucher.

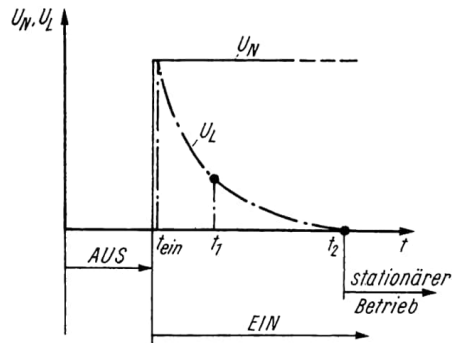


Bild 5.45. Einschalten einer Spule

Spannung einer Spule
beim Ausschalten
und nach dem
Ausschalten

Beim Ausschalten wird die gespeicherte magnetische Energie plötzlich frei und bewirkt durch Selbstinduktion eine Urspannung über der Spule, die in Richtung der (abgeschalteten) ursprünglichen Spannung wirkt.

Eine Spule, die von einer Spannungsquelle getrennt wird, wirkt kurzzeitig selbst wie eine Spannungsquelle.

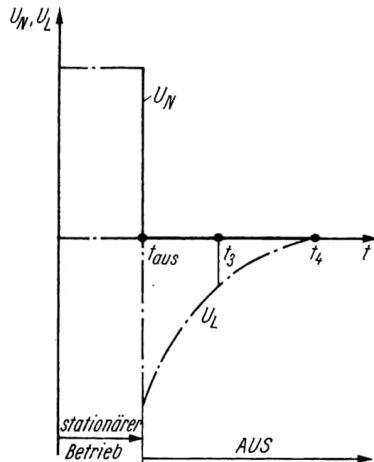


Bild 5.46
Ausschalten einer Spule

Für den Zeitverlauf der Spulenspannung gilt

$$U_L = U_N e^{-\frac{t R}{L}}$$

(5.36)

U_N vorzeichenbehaftet einsetzen.

Energiebetrachtungen für die geschaltete Spule
Energieumwandlung beim Aufbau des Magnetfeldes

Wird eine Spule an eine Speisespannung angeschlossen, erfolgt ein Energieumsatz.

Wird eine Spule an eine Speisespannung U_N angeschlossen, erfolgt ein Energieumsatz. Dem speisenden Netz wird kinetische Energie des elektrischen Strömungsfeldes entzogen, die den Aufbau des elektromagnetischen Feldes bewirkt. Mit Hilfe dieser Energie werden z.B. die Weißschen Bezirke im Ferromagnetikum ausgerichtet. Diese Energieaufnahme erfolgt nach den Beziehungen

$$\Delta W = \Delta \Phi I_L \quad \text{oder} \\ \Delta W = U_L I_L \Delta t. \quad (3.44)$$

Energiespeicherung (potentielle Energie)

Ist das elektromagnetische Feld vollständig aufgebaut, tritt ein stationärer Betriebszustand ein, indem die vorher vorhandene kinetische Energie des Strömungsfeldes in potentieller Form im Elektromagneten gespeichert wird.

Hinweis

Damit kann diese Energie nicht mehr in Form von thermischer, mechanischer oder chemischer Energie, sondern nur noch als magnetische Energie aus dem Kreis heraustreten.

Für die gespeicherte Energie in der Spule gilt:

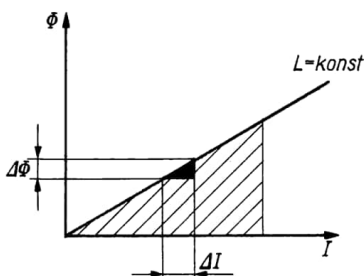
$$W_L = \frac{L I_L^2}{2} \quad (5.37)$$

Diese Beziehung kann nur mit Hilfe der höheren Mathematik vollständig abgeleitet werden.

Durch eine grafische Konstruktion kann das Verständnis für Gl. (5.37) gefördert werden.

Nach dem vollständigen Aufbau des elektromagnetischen Feldes in einer Spule und um eine Spule herum, die eine konstante Induktivität aufweist (das setzt ein konstantes μ_r voraus! - vgl. Abschn. 5.8.5.1.), gelten die Bedingungen:

$$\Phi = \text{konst.}; \quad I_L = I = \text{konst.}; \quad L = \text{konst.}$$



Der Flächeninhalt des schraffierten Dreiecks ist ein Maß für den gespeicherten Energieinhalt.

Bild 5.47
Zum Energieinhalt des elektromagnetischen Feldes

Es gilt weiterhin

$$W_{\text{pot}} = \Phi I \quad \text{und} \quad \Phi = L I$$

Damit ist $\Phi \sim I$ (außerhalb der Sättigung).

Aus der Dreiecksbeziehung folgt:

$$W_{\text{pot}} = \frac{I \Phi}{2}$$

und mit $\Phi = L I$ entsteht

$$W_{\text{pot}} = \frac{L I^2}{2}$$

Mit Hilfe der schon früher abgeleiteten Einheiten der angegebenen Größen kann die Richtigkeit der Beziehung überprüft werden:

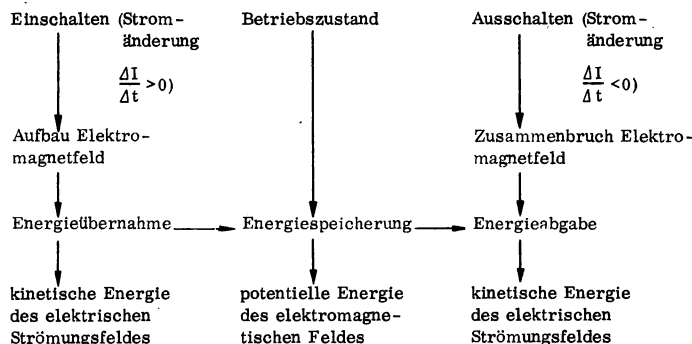
$$\left[W_{\text{pot}} \right] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ A}^2}{1 \text{ A}} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

Aus Bild 5.47 wird ersichtlich, daß die dargestellten Beziehungen auch auf sehr kleine Strom- und Magnetflußänderungen anwendbar sind. So muß vorgegangen werden, wenn Φ und I nicht proportional verlaufen. Der Energieinhalt des Feldes ergibt sich dann aus einer Summe kleinster Einzeldreieckflächen.

Energieumsatz beim Zusammenbrechen des Magnetfeldes

Beim Zusammenbrechen des Magnetfeldes wird diese Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt (Tafel 5.5).

Tafel 5.5. Energiebetrachtung



Das ist beim Abschalten großer Induktivitäten (z.B. Feldwicklungen, Hebmagnetspulen) von Gleichspannungsquellen zu beachten.

Lichtbögen, Überschlüge, Durchschläge sind Folgen des Abschaltens induktiver Kreise ohne geeignete Schaltmittel.

Um einen starken Kontaktabbrand durch Lichtbögen zwischen Schaltkontakten zu vermindern, wendet man Funkenlöschschaltungen an.

Funkenlöschung an Schaltkontakten

Dabei wird von der Überlegung ausgegangen, daß die im elektromagnetischen Feld gespeicherte Energie ganz oder teilweise zum Aufbau eines elektrostatischen Feldes verwendet und nicht mehr in Form von thermischer Energie an den Schaltkontakten wirksam wird (vgl. Bild 5.48).

Damit muß

$$W_L = W_C$$

sein. Aus Gl. (5.37) und (4.34) folgt:

$$\frac{L I_L^2}{2} = \frac{C U_C^2}{2}.$$

Durch Verhältnisbildung entsteht

$$\frac{L}{C} = \frac{U_C^2}{I_L^2}.$$

Für die Bemessung des Kondensators gilt:

$$C = L \frac{I_L^2}{U_C^2} \quad (5.38)$$

Prinzip

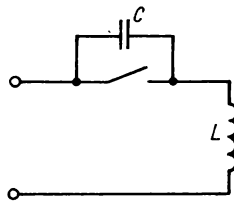


Bild 5.48
Prinzip der Funkenlöschung an Schaltkontakten

Der dem Kontakt parallelzuschaltende Kondensator kann nur eine bestimmte Kapazität haben, weil sonst eine zu hohe Spannung an ihm entsteht, die sich als Durchschlag am Schalter äußern würde. Um den Entladestrom des Kondensators beim Schließen des Kontaktes zu begrenzen, wird ein Schutzwiderstand zum Kondensator in Reihe geschaltet. Andere Möglichkeiten bestehen in der Parallelschaltung von spannungsrichtungsabhängigen (z.B. Halbleitergleichrichter) oder spannungsabhängigen (z.B. Varistoren) Bauelementen (vgl. Abschnitt 3.4.2.2.).

Hinweis

Vgl. „Grundsaltungen der Elektronik“.

5.10. Zeitkonstante von Spulen

In den Gln. (5.33) bis (5.36) erscheint der mathematische Ausdruck $\frac{L}{R}$.

Der Quotient aus der Induktivität L und ihrem Drahtwiderstand R ist eine Konstante mit der Maßeinheit einer Zeit, die für Schaltvorgänge bedeutsam ist.

Tafel 5.6. Grundbauelemente der Elektrotechnik

Bauelement	Elektromagnetisches Feld Spule	Elektrisches Strömungs-feld Widerstand	Elektrostatisches Feld Kondensator
Schaltzeichen (allgemein)			
Eigenschaft	Induktivität	ohmscher Widerstand	Kapazität
Formelzeichen	L	R	C
Einheit	$[L] = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega \cdot \text{s} = 1 \text{ H}$	$[R] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega$	$[C] = \frac{1 \text{ A} \cdot \text{s}}{1 \text{ V}} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ F}$
Bemessung der Konstruktionsgröße	$L = \frac{\mu A}{l} (\text{N}^2)$	$G = \frac{A}{\rho l} = \frac{\kappa A}{l}$ $R = \frac{\rho l}{A} = \frac{1}{\kappa A}$	$C = \frac{\epsilon A}{l}$
Idealisierung	$L \neq 0$ $R_L = 0$ $C_L = 0$	$R \neq 0$ $L_R = 0$ $C_R = 0$	$C \neq 0$ $L_C = 0$ $R_C = 0$
Vereinfachte Ersatzschaltung für die Praxis			

Tafel 5.7. Elektrisches Verhalten der elektrotechnischen Grundbauelemente

	L	R	C
Ideales Bauelement an Gleichspannung (ohne Betrachtung von Veränderungen)			
Kennzeichnung des Strom-Spannungs-Verhaltens	$E_s = -L \frac{\Delta I_L}{\Delta t}$ $U_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t}$	$I = \frac{U}{R} = \text{konst.}$	$I_C = C \frac{\Delta U_C}{\Delta t}$
Ideales Bauelement bei veränderlichen Gleichgrößen			
Ideales Bauelement beim Schaltvorgang			
Zeitkonstante	$\tau = \frac{L}{R}$		$\tau = C R$
Charakterisierung	Energiespeicher	Energiewandler	Energiespeicher

Zeitkonstante

Formelzeichen

τ

Physikalischer
Zusammenhang

$$\tau = \frac{L}{R}$$

(5.39)

Einheit

$$[\tau] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ A}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ V}} = 1 \text{ s}$$

Die Zeitkonstante τ gibt die Zeit an, nach der die Spulenstromstärke auf das $(1 - \frac{1}{e})$ -fache (etwa 63 %) ihres Endwertes angewachsen bzw. die Spulenspannung auf das $\frac{1}{e}$ -fache (etwa 37 %) ihres Anfangswertes gesunken ist.

Halbwertszeit

Als Halbwertszeit t_H wird die Zeit bezeichnet, nach der der Strom in der Spule auf die Hälfte des Anfangswertes gesunken ist.

Es gilt

$$t_H = 0,7 \tau \quad (5.40)$$

Praktische Bezüge

Die in den Bildern 5.43 bis 5.46 dargestellten Funktionen gelten in der Praxis als abgeklungen, wenn

$$t \approx 5 \tau \text{ ist.}$$

Dieser Richtwert ist insbesondere in der Signalübertragung von Bedeutung.

5.11. Kraftwirkungen elektromagnetischer Felder

5.11.1. Kraftwirkungen auf magnetisierbare Materialien

Elektromagneten sind in der Lage, magnetisierbare Materialien (vor allem Eisen) auf Grund der magnetischen Influenz anzuziehen bzw. festzuhalten oder zu bewegen (Bild 5.49).

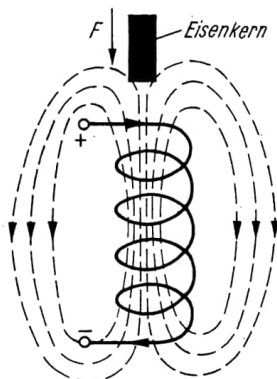
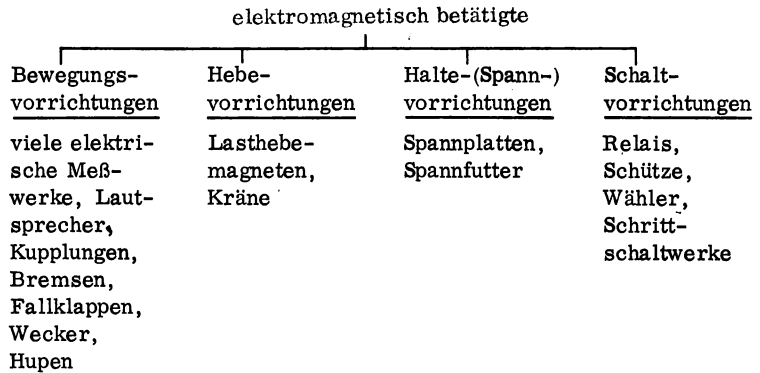


Bild 5.49
Prinzip elektromagnetischer Bewegungs-
vorrichtungen

Mit relativ geringem elektrischem Energieaufwand lassen sich hohe Magnetflußdichten erreichen. Damit können auch große Kraftwirkungen erreicht werden.

Typische Anwendungen sind:



Grundprinzip

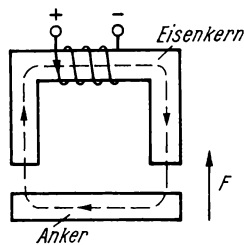
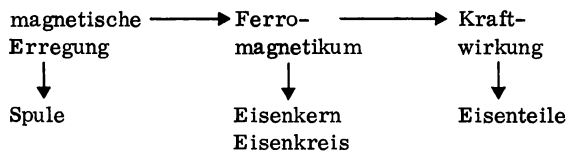


Bild 5.50
Prinzip des Hebemagneten

Berechnung der
Kraftwirkungen

Die Kraftwirkungen können überschläglich berechnet werden.

Physikalischer
Zusammenhang

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (5.41)$$

F Zugkraft in N

B Magnetflußdichte in $\frac{V \cdot s}{m^2}$,

A wirksame Polfläche in m^2 ,

μ_0 absolute Permeabilität $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Die Kraftwirkungen auf Ferromagnetika sind bei Lasthebemagneten dem Quadrat des Magnetflusses (bzw. der Magnetflußdichte) proportional.

5.11.2. Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben (Rechtsschraubenregel). Wird dieser Leiter in ein vorhandenes Magnetfeld gebracht, überlagern sich die Einzelmagnetfelder (Bild 5.51).

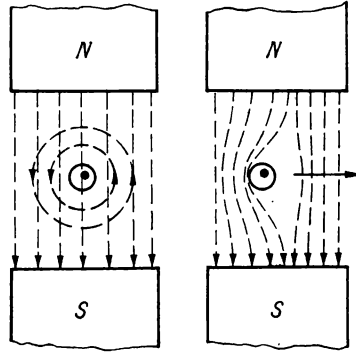


Bild 5.51
Stromdurchflossener Leiter im
Magnetfeld

Die Überlagerung führt zu einem resultierenden Magnetfluß. Dabei entstehen seitenbehaftet räumlich

- Flußverstärkung,
- Flußschwächung.

Der resultierende Magnetfluß übt eine Kraftwirkung auf den Leiter aus (Verkürzungsbestreben der Feldlinien).

Für die Richtung der Kraftwirkung gilt

Linke-Hand-Regel (Motorregel).

Hält man die linke Hand so in ein Magnetfeld, daß die Feldlinien in den offenen Handteller eintreten und die ausgestreckten vier Finger in Leiterstromrichtung zeigen, zeigt der abgespreizte Daumen in Richtung der Kraft auf den Leiter (Bild 5.52).

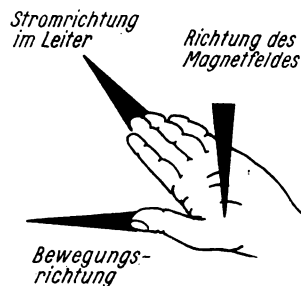


Bild 5.52
Linke-Hand-Regel (Motorregel)

Hinweis

Auf den gleichen Grundlagen beruht die U(rsache)-V(ermittlungs)-W(irkungs)-Regel.

Die Regel ist jeweils für den betrachteten Teil des Leiters anzuwenden.

Energiewandlung
elektrisch \longrightarrow magnetisch \longrightarrow mechanisch

Die am Leiter angreifende Kraft ist um so größer,

- je größer die Magnetflußdichte,
- je größer die Stromstärke im Leiter,
- je größer die magnetisch wirksame Länge

ist.

Für die am Leiter angreifende Kraft gilt

$$F = B I l_m ; \quad (5.42)$$

F Kraft auf den Leiter in N,

B Magnetflußdichte in $\frac{V \cdot s}{m^2}$,

I Stromstärke im Leiter in A,

l_m magnetisch wirksame Länge in m.

Die Kraftwirkung wird durch Verwendung mehrerer in Reihe geschalteter Leiter (Spulen) vervielfacht.

$$F = B I l_m N \quad (5.43)$$

Der stromdurchflossene Leiter kann auch drehbar im Magnetfeld angeordnet sein (Bild 5.53).

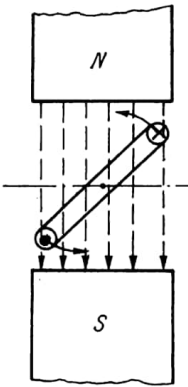


Bild 5.53

Drehbare stromdurchflossene Leiterschleife
im homogenen Magnetfeld

Motorprinzip

Da die Kraft an entsprechenden Kraftarmen angreift (Radius der Leiterschleife), gilt

$$M_d = F 2 r ,$$

$$M_d = B I l_m N 2 r . \quad (5.44)$$

Aus der Beziehung

$$M_d = \frac{\Phi}{[A]} \cdot I \cdot \left[\frac{l_m}{m} \right] \cdot \left[\frac{N}{m} \right] \cdot \left[\frac{2 r}{m} \right]$$

erkennt man, daß für einen bestimmten Motor auch bestimmte konstruktive Größen vorhanden sind.

Deshalb gilt allgemein für jeden Motor

$$M_d = C_2 \Phi I ; \quad (5.45)$$

Allgemeine
Motorengleichung

C_2 Maschinenkonstante (abhängig von der Konstruktion).

5.11.3. Elektromagnetische Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

Parallele Stromleiter	Zwischen parallel verlaufenden stromdurchflossenen Leitern entstehen durch Überlagerung von Magnetfeldern Kraftwirkungen.		
Gegensinnig stromdurchflossen	Abstoßende Kraftwirkung	Gleichsinnig stromdurchflossen	Anziehende Kraftwirkung

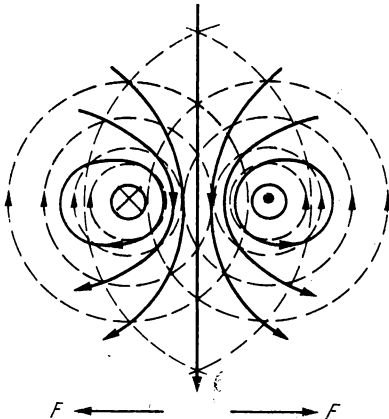


Bild 5.54
Parallele, gegensinnig stromdurchflossene Leiter

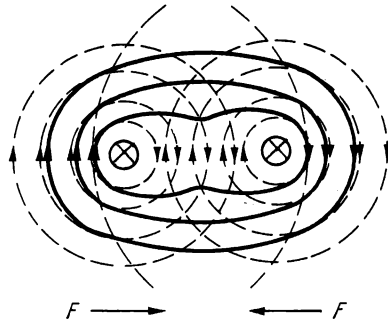


Bild 5.55
Parallele, gleichsinnig stromdurchflossene Leiter

Elektrodynamische Kraftwirkungen

Treten vor allem bei hohen Stromstärken (z. B. bei Kurzschlüssen) auf.
Deshalb müssen Sammelschienensysteme, Hochleistungswicklungen (Transformatoren, Kurzschlußdrosseln) mechanisch versteift und mit hoher Sicherheit befestigt werden.
Die zwischen parallelen stromdurchflossenen Leitern auftretende Kraft kann berechnet werden.

Berechnung der Kraftwirkungen

Physikalischer Zusammenhang

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2 \pi a} \quad (5.46)$$

- F Kraft zwischen den Leitern in N,
 μ_0 absolute Permeabilität in $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$,
 I_1 Leiterstrom 1 in A,
 I_2 Leiterstrom 2 in A,
 a Abstand der Leiter in m,
 l Länge der Leiter in m.

Definition der Grundeinheit Ampere

Mit Hilfe der elektrodynamischen Kraftwirkungen wird die Einheit der elektrischen Stromstärke definiert:
Das Ampere ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.

6. Wechselstromerscheinungen

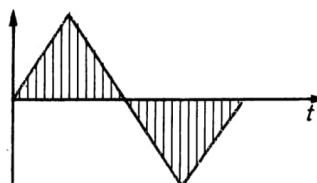
Begriffsbestimmung
„Wechselgrößen“

Unter Wechselgrößen versteht man Größen, deren Augenblickswerte $u(t)$ oder $i(t)$ zeitlichen Änderungen in Betrag und Richtung unterliegen.

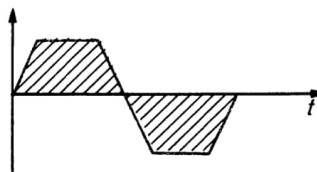
Wechselgrößen sind also schwankende Größen. Ein über einen längeren Betrachtungszeitraum gebildeter linearer Mittelwert hat den Wert Null.

Formen von
Wechselgrößen

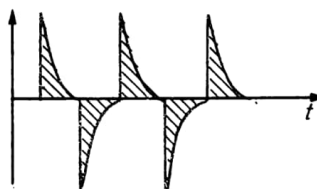
Dreieckgröße
Impulstechnik



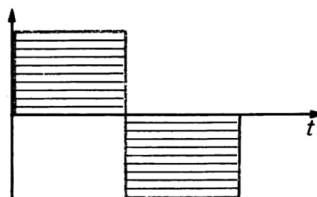
Trapezförmige Größe
Impulstechnik
elektrische Maschinen



Nadelförmige Größe
Informationsverarbeitung
Impulstechnik



Rechteckförmige Größe
Impulstechnik
Informationsverarbeitung
(ohne zeitliche Betrags-
änderung)



Sinusförmige Größe
Leistungselektrotechnik
Informations-
elektrotechnik

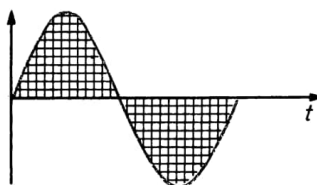


Bild 6.1
Formen von Wechselgrößen

6.1. Sinusförmige Wechselspannung

Begriffsbestimmung
 „sinusförmige
 Wechselspannung“

Eine sinusförmige Wechselspannung ist eine Spannung, deren Augenblickswert periodisch nach einer Sinusfunktion der Zeit verläuft.

Vorzüge

Die Sinusform hat gegenüber anderen Formen bedeutende Vorzüge:

- Spannungen und Ströme ändern sich stetig ohne Spitzen oder Sprünge (vgl. Bild 6.1).
- Das Prinzip der Gegeninduktion (Transformatoren) ist günstig einsetzbar (vgl. Abschn. 5.8.3.).
- Die Sinusform wird durch die Grundbauelemente R, L, C nicht verändert (vgl. Abschn. 6.2.1.1.).
- Die Leistungsübertragung kann gleichmäßig und verlustarm erfolgen.
- Die Spannungserzeugung kann in mehreren parallelgeschalteten Generatoren verhältnismäßig einfach erfolgen, ohne daß große Ausgleichsströme fließen.
- Die Verläufe von Spannung, Strom und Leistung sind grafisch und mathematisch einfach erfaßbar.

Erzeugung

Technische Wechselspannungen dürfen nur geringfügig von der idealen Sinusform abweichen.

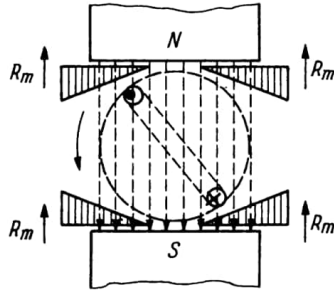


Bild 6.2
 Prinzip der Erzeugung sinusförmiger Spannungen

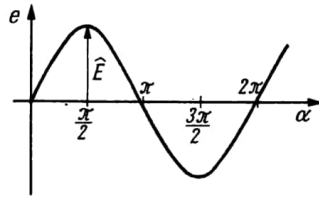


Bild 6.3
 Sinusspannung in Abhängigkeit von einer Drehbewegung

Bei Drehung einer Leiterschleife im parallel-homogenen Magnetfeld entsteht eine sinusförmige Wechselspannung

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (\text{vgl. Bilder 6.2 und 6.3}).$$

Die Drehbewegung liefert unter diesen Bedingungen sinusförmige Wertänderungen. Die Anordnung kann in der Praxis nicht zur Spannungserzeugung genutzt werden, da der magnetische Widerstand sehr groß ist (vgl. Bild 6.2).

Man baut deshalb Generatoren mit sehr kleinem Luftspalt. Die Feldlinien treten dabei immer senkrecht in die Polschuhe ein, d.h., die Drehbewegung liefert keine sinusförmige Änderung mehr.

Um eine sinusförmige Spannung zu erhalten, müssen die Generator-Polschuhe besonders konstruiert und die Wicklungen des Generators in geeigneter Form angeordnet sein.

Sinusförmige Spannungen entstehen nicht zwangsläufig durch Drehbewegung von Leiterschleifen im Magnetfeld, sondern durch geeigneten konstruktiven Aufbau.

6.1.1. Bestimmungsgrößen sinusförmiger Wechselspannungen und -ströme

Spitzenwert Nach Bild 6.3 gilt für einen sinusförmigen Verlauf

$$e = \hat{E} \sin \alpha ; \quad (6.1)$$

\hat{E} Spitzenwert der erzeugten Ursprungung.

Positive und negative Halbwelle der Sinusspannung ergeben einen vollen Durchlauf (eine Periode, eine Welle, eine Schwingung).

Periodendauer Die Periodendauer T ist die kleinste Zeitdauer, nach der sich eine periodische Größe wiederholt.

Einheit $[T] = 1 \text{ s}$

Frequenz Die Anzahl der entstehenden Perioden in der Zeiteinheit ist die Frequenz. Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer.

Formelzeichen f

Physikalischer Zusammenhang $f = \frac{1}{T}$ (6.2)

Einheit Hertz
 $[f] = \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ Hz}$

(Heinrich Hertz, 1857–1894, deutscher Physiker)

Tafel 6.1. Richtwerte für technische Frequenzen

Bereich Hz	Anwendung
16 2/3	Bahnfrequenz der Deutschen Reichsbahn
50	technischer Wechselstrom
16 ... 20 000	Hörbarkeitsbereich Niederfrequenz
bis $3 \cdot 10^5$	Langwelle LW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^6$	Mittelwelle MW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^7$	Kurzwelle KW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^8$	Ultrakurzwelle UKW FM-Rundfunk
$(48 \dots 230) \cdot 10^6$	Fernsehbänder VHF
$(470 \dots 630) \cdot 10^6$	Fernsehbänder UHF

Hoch-
frequenz

Die Frequenz eines rotierenden Generators ist von der Drehzahl und von der Polpaarzahl abhängig.

Es gilt

$$f = \frac{n p}{60} ; \quad (6.3)$$

f Frequenz in Hz
 n Drehzahl in min^{-1}
 p Polpaarzahl

Tafel 6.2. Reihe der synchronen Drehzahlen bei $f = 50 \text{ Hz}$

Polpaar- zahl	1	2	3	4	...	10	...	32
Drehzahl min^{-1}	3000	1500	1000	750	...	300	...	94

Winkel-
geschwindigkeit

Für Drehbewegungen ist eine besondere Geschwindigkeitsangabe zweckmäßig. Um von Abmessungen unabhängig zu sein, verwendet man dazu die Winkelgeschwindigkeit ω

$$\omega = \frac{\hat{\alpha}}{t}$$

Beim Durchlaufen eines Vollkreises ist

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Mit $T = \frac{1}{f}$ entsteht

Formelzeichen

ω

Physikalischer
Zusammenhang

$$\omega = 2\pi f$$

(6.4)

Einheit

$$[\omega] = \frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$$

Kreisfrequenz

In der Elektrotechnik bezeichnet man ω als Kreisfrequenz. Sie gibt an, wievielmals in 2π Sekunden der Radius einen Vollkreis beschreibt.

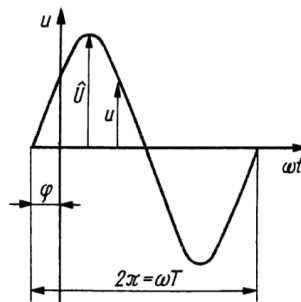


Bild 6.4
Maximalwert und Momentwert einer
Sinusspannung

Augenblicks- oder
Momentanwerte

Die in jedem Augenblick entstehenden Werte von Sinusgrößen.

Maximalwert,
Spitzenwert

Der größte Momentanwert einer Sinusgröße.

Grundgesetz der
Wechselstromtechnik

$$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi)$$

(6.5)

Sinuszeitgesetz. Es gilt analog für andere sinusförmige Größen, z. B. auch für sinusförmige Ströme.

$$i = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi)$$

(6.5 a)

Zu einem Zeitpunkt t ist ein bestimmter Bewegungszustand vorhan-

den, der sich in periodischen Abständen T wiederholt. Der Phasenwinkel φ ist notwendig, um Sinusgrößen mit unterschiedlicher Phasenlage zu kennzeichnen. Der zur Zeit $t = 0$ vorhandene Phasenwinkel heißt Nullphasenwinkel.

Mittelwerte

Zur Beschreibung der Wirkungen von Wechselgrößen werden meist Mittelwerte verwendet.

Effektivwert

Der Mittelwert einer Wechselgröße, der die gleichen Wirkungen wie ein Gleichstrom hervorruft, ist deren Effektivwert.

Die verrichtete Wärmearbeit kann nach dem Jouleschen Gesetz als Flächeninhalt

$$W = P t$$

dargestellt und berechnet werden.

Für sinusförmigen Wechselstrom gilt

$$W = \hat{I}^2 \sin^2 \omega t R t.$$

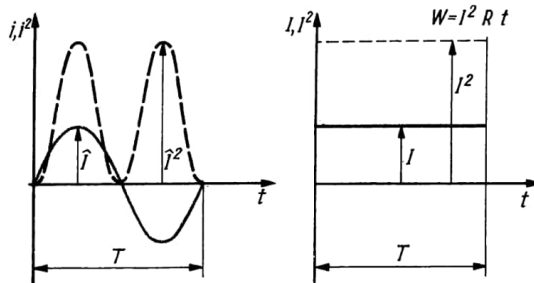


Bild 6.5. Vergleich zwischen der Wärmearbeit von Wechselstrom und Gleichstrom

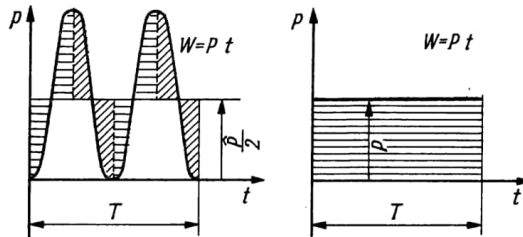


Bild 6.6. Darstellung der Wärmearbeit als Fläche

Es gilt

$$W_{\sim} = W_{-},$$

$$\frac{\hat{P}}{2} T = P T,$$

$$\frac{\hat{I}^2}{2} R T = I^2 R T,$$

$$\frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = I_{(\text{eff})} \quad (6.6)$$

$$\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = U_{(\text{eff})} \quad (6.7)$$

Der Effektivwert einer sinusförmigen Wechselgröße beträgt 70,7 % des Spitzenwertes.

Üblich ist es in der technischen Praxis, den Effektivwert von Spannungen und Strömen ohne Index anzugeben.

(z.B. $U = 220 \text{ V} \longrightarrow \hat{U} = 311 \text{ V}$).

**Arithmetischer
Mittelwert**

Werden gleichgerichtete Wechselstromhalbwellen für elektrolytische Anlagen benutzt, wird ein Mittelwert verwendet, der während einer Halbwelle die gleiche Elektrizitätsmenge ergibt wie ein sinusförmig verlaufender Strom. Man bezeichnet diesen Wert als arithmetischen oder elektrolytischen Mittelwert.

Es gilt

$$\bar{I} = 0,637 \hat{I}, \quad (6.8)$$

$$\bar{U} = 0,637 \hat{U}. \quad (6.9)$$

Der arithmetische Mittelwert einer sinusförmigen Wechselgröße beträgt etwa 64 % des Spitzenwertes.

6.1.2. Grafische Darstellung und Darstellungshilfen

Periodische Vorgänge, wie z.B. die Sinusspannung, werden in der Technik zur besseren Übersicht in Diagrammen dargestellt.

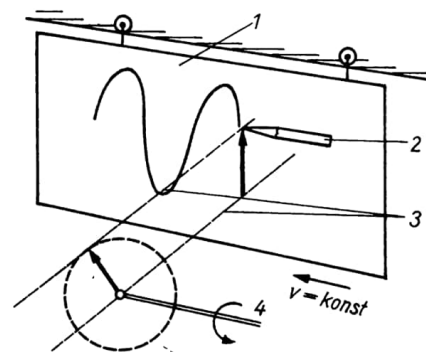


Bild 6.7
Modell zur Entstehung eines Liniendiagramms aus einem rotierenden Zeiger
1 Projektionsfläche; 2 Zeichengerät; 3 Lichtstrahlen; 4 Antrieb

Bewegt man entsprechend Bild 6.7 einen Zeiger durch einen Antrieb mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und bildet ihn durch parallel verlaufende Lichtstrahlen auf einer Projektionsfläche als Schatten ab, so ändert sich die Länge des Zeigerschattens sinusförmig mit der Zeit. Wird die Projektionsfläche senkrecht zum Lichtstrahleinfall gleichförmig bewegt, zeichnet das Zeichengerät eine Sinuslinie (Liniendiagramm).

Liniendiagramm

Die Darstellung einer sinusförmigen Wechselgröße wird aus der zeitlichen Abwicklung der Projektion eines als rotierenden Zeiger dargestellten Scheitelwertes gewonnen.

Als Bewegungsrichtung wird der Gegenuhrzeigersinn festgelegt.

Die Augenblickswerte sind über dem Drehwinkel $\alpha = \omega t$ (vgl. Winkelgeschwindigkeit) als Strecken aufgetragen. Ihre Endpunkte liegen auf einer Linie, die das Bild der Zeitfunktion ist.

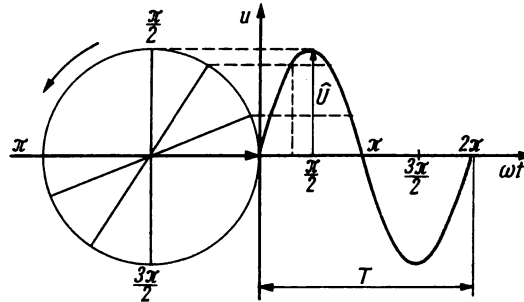


Bild 6.8. Konstruktion eines Liniendiagramms aus einem rotierenden Zeiger

Hinweis

Die Arbeit mit dem Liniendiagramm ist umständlich, da die gesamte Sinuslinie gezeichnet werden muß. Bei der Darstellung von mehr als vier Sinusgrößen ist das Liniendiagramm nicht mehr brauchbar.

Zeigerdiagramm

Ein umlaufender Zeiger ist eine Strecke, die mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um einen Endpunkt rotiert. Die Länge des Zeigers entspricht dem Scheitelwert der Sinusfunktion.

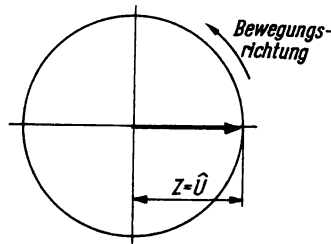


Bild 6.9

Darstellung der Wechselspannung bzw. des Wechselstroms als Zeiger

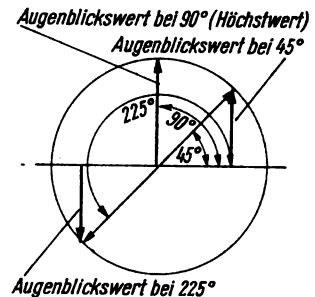


Bild 6.10

Konstruktion der Augenblickswerte aus dem Zeigerdiagramm

Bei der Erarbeitung der Konstruktion des Zeigerdiagramms wird vom Liniendiagramm ausgegangen. Die horizontale Achse wird als Bezugsachse für die umlaufende Strecke gewählt. Der Umlauf erfolgt in mathematisch positivem Drehsinn.

Die Zeit für einen Umlauf ist der Schwingungsdauer T gleich.

Um für eine beliebige Zeigerstellung den ihr entsprechenden Augenblickswert der Spannung oder der Stromstärke zu ermitteln, fällt man

das Lot von der Zeigerspitze auf die durch den Mittelpunkt des Kreises gehende waagerechte Achse. Die Lotlänge entspricht dem jeweiligen Augenblickswert.

Kennzeichnende Bestimmungsstücke bei der Zeigerdarstellung sind

- Amplitude oder Betrag der sinusförmigen Größe
Die Länge des Zeigers ist ein Maß für die Amplitude. Dabei wird der gewählte Längenmaßstab (z. B. V/mm oder A/mm) auf den Effektivwert der Wechselgröße bezogen.
- Frequenz der sinusförmigen Größe
Tritt beim Zeigerdiagramm nicht in Erscheinung. Also können in einer Zeigerdarstellung nur Größen mit gleicher Frequenz dargestellt werden.

Hinweis

In der Leistungselektrotechnik ist diese Einschränkung meist garantiert. Besonders in der Hochfrequenztechnik werden bei Größen unterschiedlicher Frequenz andere geeignete Darstellungsverfahren angewendet.

- Phasenlage der sinusförmigen Größen untereinander
Sind zwei oder mehrere sinusförmige Größen zeitlich verschoben, so wird das durch den Winkel zwischen den Größen verdeutlicht.

Zeiger sind durch Betrag, Lage (Winkel) und Kreisfrequenz eindeutig gekennzeichnet.

In der technischen Praxis werden meist ruhende Zeiger zur Veranschaulichung von Vorgängen verwendet.

Haben die darzustellenden Sinusgrößen die gleiche Kreisfrequenz, so kann man auf den Umlauf verzichten. Aus diesem „in Ruhe“ befindlichen Zeigerdiagramm bei $t = 0$ können die Scheitelwerte (Betrag des Zeigers) und die Phasenlage (Winkel) der Sinusfunktionen leicht abgelesen werden. In der Regel stellt man mittels ruhender Zeiger Effektivwerte dar (z. B. U, I).

Beispiel:

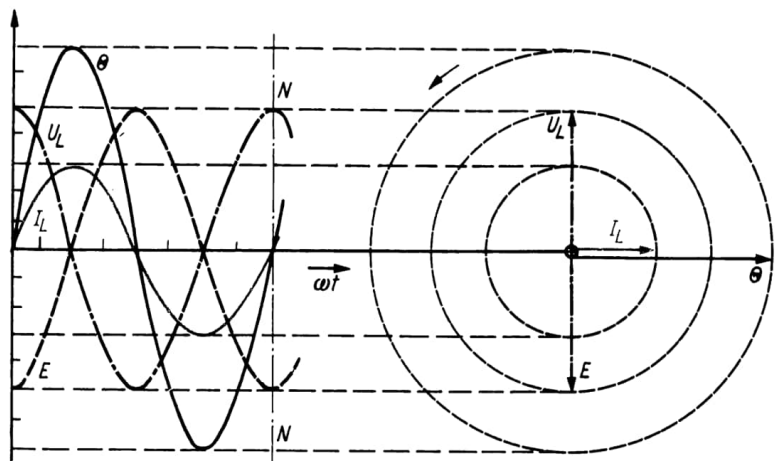


Bild 6.11. Darstellung verschiedener Größen an einer mit sinusförmiger Wechselspannung gespeisten idealen Spule

Im Bild 6.11 wird die Zuordnung der Zeiger der Größen zueinander beispielsweise nicht bei $\omega t = 0$, sondern bei ωt an der Stelle N-N dargestellt. Es ist also möglich, Zeiger von sinusförmigen Größen zu beliebigen Zeitpunkten darzustellen.

Hinweis

Das Arbeiten mit Linien- und Zeigerdiagrammen wird in den Abschnitten 6.2. und 6.3. an vielen Beispielen ausführlich gezeigt und erläutert.

6.2. Wechselstromerscheinungen bei passiven und aktiven Zweipolen

6.2.1. Passive Zweipole im Wechselstromkreis

Elemente des Wechselstromkreises

Jeder Wechselstromkreis besteht aus Spannungsquelle(n) mit den typischen zugeordneten Eigenschaften und aus angeschlossenen Betriebsmitteln. Damit entspricht jeder Wechselstromkreis im Aufbau dem Grundstromkreis (vgl. Abschn. 3.6.1.).

Betriebsmittel

- Widerstand
- Kondensator
- Spule
- Kombinationen von Widerstand, Kondensator und (oder) Spule

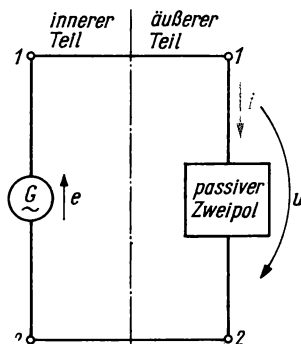


Bild 6.12
Wechselstromkreis (allgemein)

6.2.1.1. Ideale Widerstände, Spulen und Kondensatoren

Idealer Widerstand

Es muß gelten

$$R \neq 0, \quad C_R = 0, \quad L_R = 0.$$

Ein idealer Widerstand hat keine Kapazität und keine Induktivität.

Ideale Spule

Es muß gelten

$$L \neq 0, \quad R_L = 0, \quad C_L = 0.$$

Eine ideale Spule hat keinen Widerstand und keine Kapazität (vgl. dazu Abschn. 5.8.5.4.).

Idealer Kondensator

Es muß gelten

$$C \neq 0, \quad L_C = 0, \quad R_C = \infty.$$

Ein idealer Kondensator hat keine Induktivität und einen unendlichen Widerstand.

Elemente des Wechselstromkreises

Die idealisierten elektrotechnischen Grundbauelemente sind auch Grundbauelemente jedes Wechselstromkreises.

Verhalten Widerstand

Für den Widerstand mit der Eigenschaft ohmscher Widerstand gilt

$$R = \frac{u_R}{i_R} = \frac{U_R}{I_R} = \text{konst.}; \quad (6.10)$$

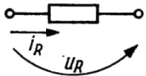


Bild 6.13. Strom und Spannung am Widerstand

$$u_R = i_R R \quad \text{oder} \quad i_R = u_R \frac{1}{R}.$$

Strom und Spannung am Widerstand sind einander direkt proportional.

Spannung und Strom erreichen also zur gleichen Zeit Nulldurchgänge, proportionale Momentanwerte und Höchstwerte.

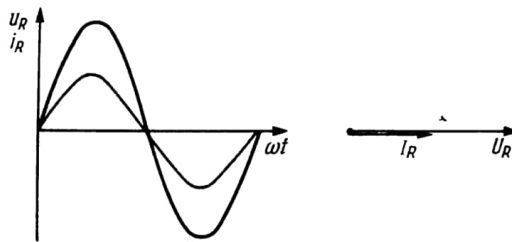


Bild 6.14. Strom- und Spannungsverlauf am Widerstand

Beim idealen Widerstand liegen Spannung und Strom phasengleich („in Phase“).

Es gilt

$$\varphi_u = \varphi_i.$$

Spule

Für die Spule mit der Eigenschaft Induktivität gilt der Zusammenhang

$$u_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad [\text{vgl. mit Gln. (5.23) und (5.27)}].$$



Bild 6.15. Strom und Spannung an der Spule

An den Stellen der größten Stromänderungsgeschwindigkeit (d.h. an den Nulldurchgängen) muß die Spannung über der Spule ihre Höchstwerte erreicht haben. An den Stellen der geringsten zeitlichen Stromänderung (Höchstwerte) muß die Spannung gering oder Null sein (vgl. Abschn. 5.8.5.5. und Bild 5.41).

Nulldurchgänge, Momentan- und Höchstwerte von Spannung und Strom sind also nicht zu den gleichen Zeitpunkten vorhanden.

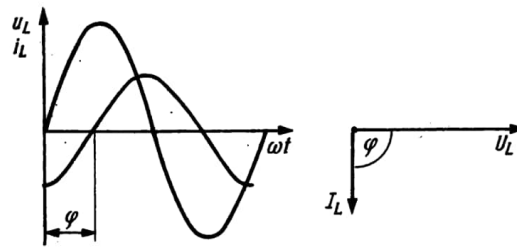


Bild 6.16. Strom- und Spannungsverlauf an der Spule

Bei der idealen Spule liegen Spannung und Strom um $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ phasenverschoben. Der Strom eilt der Spannung nach.

Es gilt

$$\varphi_u \neq \varphi_i;$$

$$\varphi_i = \varphi_u - 90^\circ = \varphi_u - \frac{\pi}{2}.$$

Kondensator

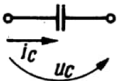


Bild 6.17
Strom und Spannung
am Kondensator

Für den Kondensator mit der Eigenschaft Kapazität gilt

$$i_C = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t} \quad [\text{vgl. mit Gl. (4.29)}].$$

Tritt die größte zeitliche Spannungsänderung (Nulldurchgänge) auf, fließt der größte Strom am Kondensator.

Der Strom wird Null, wenn sich die Spannung zeitlich nicht ändert (am Höchstwert) (vgl. Abschn. 4.9.2. und Bild 4.20).

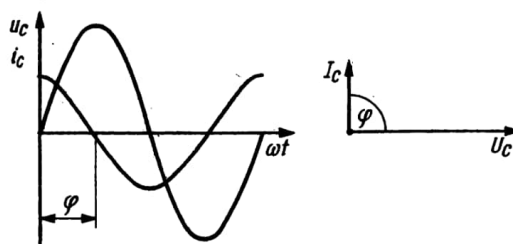


Bild 6.18. Strom- und Spannungsverlauf am Kondensator

Am idealen Kondensator liegen Spannung und Strom um $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ phasenverschoben. Der Strom eilt der Spannung voraus.

$$\varphi_u \neq \varphi_i$$

$$\varphi_i = \varphi_u + 90^\circ = \varphi_u + \frac{\pi}{2}.$$

Widerstands-
beziehungen

Idealer Widerstand R
(Resistenz)

Der ohmsche Widerstand eines idealen Widerstandes ist nicht von der jeweiligen Stromart abhängig.

Es gilt

$$R = \frac{u}{i} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \quad \hat{U} = U \sqrt{2}; \quad \hat{I} = I \sqrt{2};$$

$$R = \frac{U}{I} \quad [\text{vgl. Gl. (3.11)}]. \quad (6.11)$$

Idealer Leitwert G

Für den Leitwert gilt

$$G = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} \quad [\text{vgl. Gln. (3.9), (3.10)}]. \quad (6.12)$$

Idealer induktiver
Blindwiderstand X_L
(Induktanz)

Für die Induktivität einer idealen Spule besteht zwischen Spannung und Strom der Zusammenhang

$$u_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}.$$

Für sehr kleine Winkel kann die Gleichung für den Strom

$$i_L = \hat{I}_L \sin \omega t \quad \text{umgeformt werden in}$$

$$i_L \approx \hat{I}_L \omega t.$$

Die maximale Stromänderungsgeschwindigkeit tritt beim Nulldurchgang auf

$$(\Delta i_L)_{\max} = \hat{I}_L \omega \Delta t,$$

$$\left(\frac{\Delta i_L}{\Delta t} \right)_{\max} = \hat{I}_L \omega,$$

Einsetzen in die Ausgangsgleichung ergibt:

$$L \left(\frac{\Delta i_L}{\Delta t} \right)_{\max} = \hat{U}_L,$$

$$\hat{U}_L = \hat{I}_L \omega L;$$

$$\frac{\hat{U}_L}{\hat{I}_L} = \frac{U_L}{I_L} = \omega L.$$

Der Quotient aus Spulenspannung und Spulenstrom wird als induktiver Blindwiderstand definiert.

$$X_L = \omega L \quad (6.13)$$

Ein Blindwiderstand hat nicht den physikalischen Charakter eines Widerstandes.

Der induktive Blindwiderstand ist ein Maß für die strombehindernde Eigenschaft einer Spule bei Wechselstrom.
Im Blindwiderstand wird die Spannungsabhängigkeit des induktiven Stromes dargestellt.

Idealer induktiver
Blindleitwert B_L

Für den induktiven Blindleitwert wird definiert

$$B_L = \frac{I_L}{U_L} = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} . \quad (6.14)$$

Idealer kapazitiver
Blindwiderstand X_C
(Kondensanz)

Analog gilt für die Kapazität des idealen Kondensators

$$i_C = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t} .$$

$$u_C = \hat{U}_C \sin \omega t \quad \text{geht am Nulldurchgang (bzw. bei sehr kleinen Winkeln } \omega t) \text{ in}$$

$$u_C = \hat{U}_C \omega t \quad \text{über.}$$

Analog zur idealen Spule kann abgeleitet werden

$$\frac{\hat{U}_C}{\hat{I}_C} = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C} . \quad (6.15)$$

Der Quotient aus Kondensatorsspannung und Kondensatorstrom wird als kapazitiver Blindwiderstand definiert.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (6.16)$$

Hinweis

Es wird unter dem Begriff kapazitiver Blindwiderstand nur die Spannungsabhängigkeit des Stromes verstanden. Der kapazitive Blindwiderstand ist ein Maß für die strombehindernde Eigenschaft eines Kondensators bei Wechselstrom.

Idealer kapazitiver
Blindleitwert B_C
(Kapazität)

Für den kapazitiven Blindleitwert wird definiert

$$B_C = \frac{I_C}{U_C} = \frac{1}{X_C} = \omega C . \quad (6.17)$$

Frequenzverhalten
Idealer Widerstand

$$R = \frac{U}{I}$$

Ideale ohmsche Widerstände
sind frequenzunabhängig.

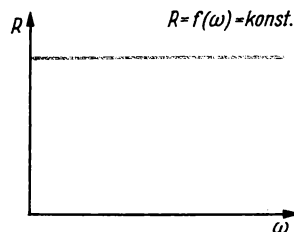


Bild 6.19
Frequenzverhalten von Widerständen

Idealer induktiver
Blindwiderstand

$$X_L = \omega L$$

Induktive Blindwiderstände
sind frequenzabhängige Größen.

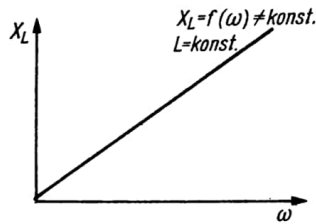


Bild 6.20
Frequenzverhalten von induktiven Blind-
widerständen

Idealer kapazitiver
Blindwiderstand

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Kapazitive Blindwiderstände
sind frequenzabhängige Größen.

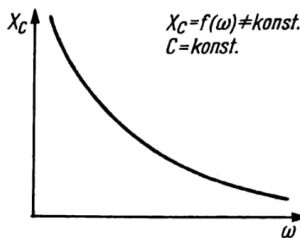


Bild 6.21
Frequenzverhalten von kapazitiven Blind-
widerständen

Leistungsbetrachtung
Leistungsumsatz am
idealen Widerstand

Für die Leistung gilt in jedem Augenblick

$$p = u \cdot i$$

(6.18)

Durch Multiplikation der Momentanwerte von Spannung und Strom-
stärke ergibt sich stets eine positive Leistung.

Diese elektrische Leistung tritt aus dem Stromkreis z.B. als ge-
wandelte Leistung (Wärme) heraus (Wirkleistung).

Die mittlere Leistung an einem Widerstand tritt als abgegebene
Leistung, die Wirkungen außerhalb des Stromkreises hervorruft,
auf.

Das Grundbauelement Widerstand wird wegen dieser Eigenschaft als
Wirkwiderstand bezeichnet.

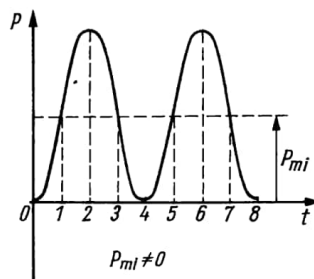


Bild 6.22
Leistungsverlauf am Wirkwiderstand

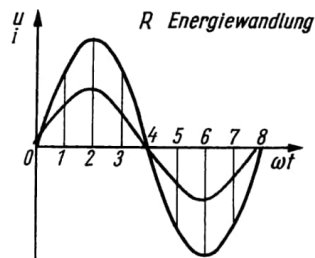


Bild 6.23
Strom- und Spannungsverlauf am Wirkwider-
stand

Leistungsumsatz am
idealen induktiven
Blindwiderstand

Induktive
Blindleistung

Durch den zur Spannung phasenverschoben nacheilenden Strom ergibt sich durch Multiplikation eine ständig pendelnde Leistung.

Es tritt beim idealen induktiven Blindwiderstand keine Leistung aus dem Kreis heraus.

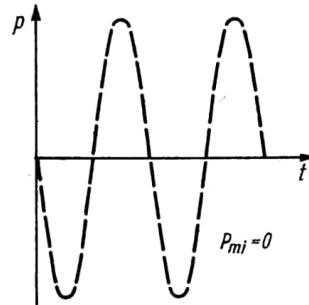


Bild 6.24
Leistungsverlauf am induktiven Blindwiderstand

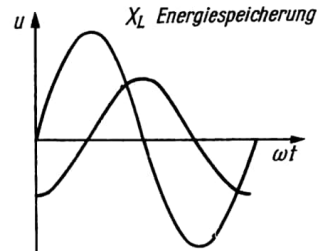


Bild 6.25
Strom- und Spannungsverlauf am induktiven Blindwiderstand

Beim idealen induktiven Blindwiderstand findet eine ständige Leistungspendelung zwischen der Spannungsquelle und dem induktiven Betriebsmittel statt (Aufbau und Zusammenbruch des elektromagnetischen Feldes).

Leistungsumsatz am
idealen kapazitiven
Blindwiderstand

Kapazitive
Blindleistung

Auch beim idealen kapazitiven Blindwiderstand tritt wegen der Phasenverschiebung des Stromes zur Spannung keine Leistung aus dem Kreis heraus.

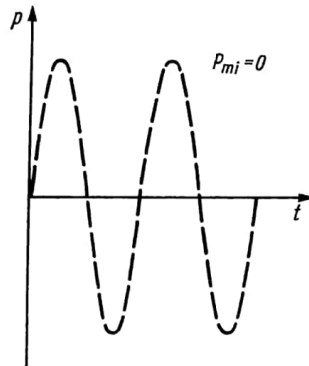


Bild 6.26
Leistungsverlauf am kapazitiven Blindwiderstand

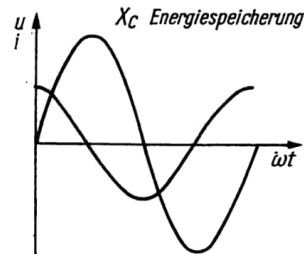


Bild 6.27
Strom- und Spannungsverlauf am kapazitiven Blindwiderstand

Die Leistungspendelung am idealen kapazitiven Blindwiderstand tritt wie beim induktiven Blindwiderstand zwischen Spannungsquelle und Betriebsmittel auf (Aufbau und Zusammenbruch des elektrostatischen Feldes).

Induktive und kapazitive Blindleistung verlaufen entgegengesetzt.

6.2.1.2. Zusammenschaltungen von idealen Widerständen, Spulen und Kondensatoren

Wie alle Zweipole können die Wechselstromwiderstände schaltungs-technisch miteinander verknüpft werden.

Man unterscheidet

- Reihenschaltungen,
- Parallelschaltungen,
- Gemischtschaltungen

von Wechselstromwiderständen.

Hinweis

Die letztgenannten Schaltungen werden in der Berufsausbildung nicht oder selten berechnet.

Für die Berechnung von Wechselstromkreisen gelten die gleichen Grundgesetze wie bei der mathematischen Erfassung von Gleichstromkreisen.

Es gelten

- Knotenpunktsatz (1. Kirchhoffsches Gesetz),
- Maschensatz (2. Kirchhoffsches Gesetz).

Bei der Anwendung dieser Gesetze ist in Wechselstromkreisen die Phasenlage von Strömen und Spannungen zu berücksichtigen.

6.2.1.2.1. Reihenschaltungen

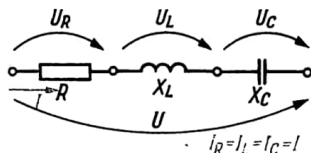


Bild 6.28

Reihenschaltung von Wirkwiderstand, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand

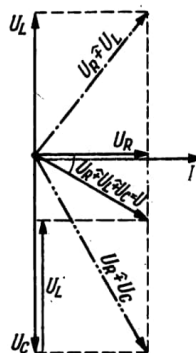


Bild 6.29

Geometrische Addition der Teilspannungen in der Reihenschaltung

Die Teilspannungen in einer Reihenschaltung von R , X_L und X_C sind zu dem sie hervorruftenden Strom und zueinander phasenverschoben. Deshalb sind sie geometrisch zu addieren.

Spannungen und Ströme

Berechnung der Teilspannungen

Für die Teilspannungen gilt

$$U_R = I R \quad \text{Wirkspannung,} \quad (6.19)$$

$$U_L = I X_L = I \omega L \quad \text{induktive Blindspannung,} \quad (6.20)$$

$$U_C = I X_C = I \frac{1}{\omega C} \quad \text{kapazitive Blindspannung.} \quad (6.21)$$

Gesamtspannung

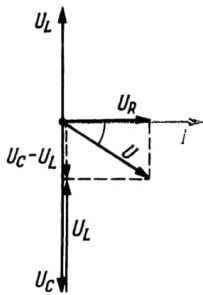


Bild 6.30
Zur Berechnung einer
Reihenschaltung ($U_C > U_L$)

Mit Hilfe der geometrischen Addition ergibt sich die Gesamtspannung

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_C - U_L)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

daß $U_C > U_L$, d. h., wenn $X_C > X_L$, oder

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

daß $U_L > U_C$, d. h., wenn $X_L > X_C$.

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_{bl}^2} \quad (6.22)$$

U_{bl} resultierende Blindspannung.

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + (I X_L - I X_C)^2}$$

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6.23)$$

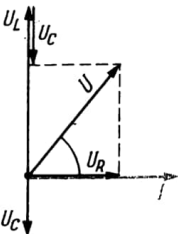


Bild 6.31
Zur Berechnung einer
Reihenschaltung ($U_L > U_C$)

Hinweis

In Reihenschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen kann die Gesamtspannung durchaus kleiner sein als einzelne Teilspannungen. Das ist bei Berechnungen zu beachten.

Phasenverhältnisse

Phasenverschiebung

Je nach den in Reihenschaltungen verwendeten Bauelementen treten zwischen den Teilspannungen und dem Strom Phasenverschiebungen auf.

Phasenverschiebungswinkel φ

Die Größe dieser Phasenverschiebung kann als Phasenverschiebungswinkel φ angegeben werden.

Es wird definiert:

Der Phasenverschiebungswinkel φ zwischen zwei sinusförmigen Wechselgrößen gleicher Frequenz ist die Differenz ihrer Nullphasenwinkel φ_1 und φ_2 .

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (6.24)$$

Folgende Fälle sind möglich:

$$\varphi_1 > \varphi_2 \longrightarrow \varphi > 0 \longrightarrow \text{Voreilen der Größe 1,}$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 \longrightarrow \varphi = 0 \longrightarrow \text{Phasengleichheit,}$$

$$\varphi_1 < \varphi_2 \longrightarrow \varphi < 0 \longrightarrow \text{Nacheilen der Größe 1.}$$

(Vgl. dazu Abschn. 6.2.1.1.)

Berechnung der
Phasenverschiebung

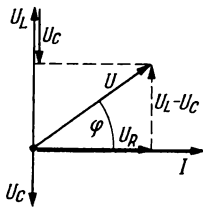


Bild 6.32. Zur Berechnung der Phasenverschiebung

Kann nach folgenden Beziehungen erfolgen:

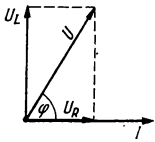
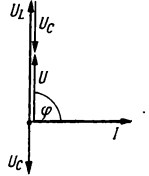
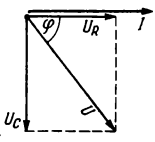
$$\sin \varphi = \frac{U_L - U_C}{U} \quad \text{oder} \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{\frac{U}{I}},$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} \quad \text{oder} \quad \cos \varphi = \frac{R}{\frac{U}{I}},$$

$$\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} \quad \text{oder} \quad \tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

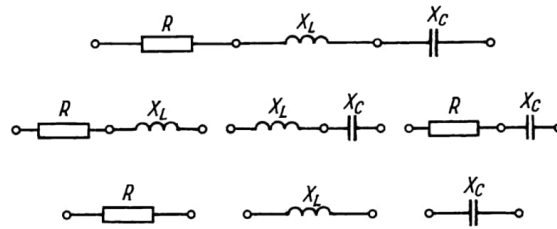
$$\left(\cot \varphi = \frac{U_R}{U_L - U_C} \right)$$

Tafel 6.3. Berechnungsgrundlagen für Sonderfälle von Wechselstromreihenschaltungen

R und X_L in Reihe	X_L und X_C in Reihe	R und X_C in Reihe
$X_C = 0 \Rightarrow U_C = 0$	$R = 0 \Rightarrow U_R = 0$	$X_L = 0 \Rightarrow U_L = 0$
		
$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$	$U = U_L - U_C$ $U = U_C - U_L$	$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$
$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	$\frac{U}{I} = X_L - X_C$ $\frac{U}{I} = X_C - X_L$	$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$
$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{\frac{U}{I}}$	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{\frac{U}{I}}$

Grundtypen von Wechselstrom-reihenschaltungen

Nicht immer sind alle drei Grundbauelemente R, L und C in einer Reihenschaltung vorhanden. Folgende Grundkombinationen sind möglich:



Sonderfälle

Bild 6.33. Varianten von Wechselstromreihenschaltungen

Erweitertes Ohmsches Gesetz

Aus Gl. (6.23) geht hervor, daß in Wechselstromreihenschaltungen ein Gesamtwiderstand definiert werden kann. Es gilt

Scheinwiderstand Z (Impedanz)

$$\frac{U}{I} = Z$$

(6.25)

Der Quotient aus Gesamtspannung und Gesamtstrom in Wechselstromkreisen wird als Scheinwiderstand bezeichnet.

Das Ohmsche Gesetz wird damit auch auf die Zusammenschaltung von Wirk- und Blindwiderständen erweitert.

Scheinleitwert Y

Er wird definiert

$$\frac{I}{U} = Y$$

(6.26)

6.2.1.2.2. Parallelschaltungen

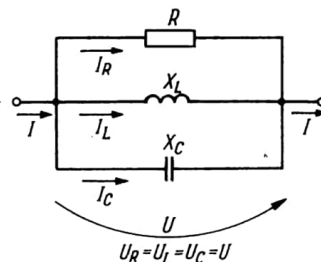


Bild 6.34
Parallelschaltung von Wirkwiderstand, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand

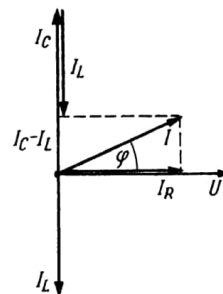


Bild 6.35
Geometrische Addition der Teilströme in der Parallelschaltung

Die Teilströme in einer Parallelschaltung von R , X_L und X_C sind zu der sie hervorruftenden Spannung und zueinander phasenverschoben. Deshalb sind sie geometrisch zu addieren.

Ströme und
Spannungen
**Berechnung der
Teilströme**

$$I_R = \frac{U}{R} \rightarrow I_R = U G \quad \text{Wirkstrom,} \quad (6.27)$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} \rightarrow I_L = U B_L \quad \text{induktiver Blindstrom,} \quad (6.28)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} \rightarrow I_C = U B_C \quad \text{kapazitiver Blindstrom.} \quad (6.29)$$

Gesamtstrom

Aus Bild 6.35 ist ableitbar

$$\textcircled{*} I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

$$\text{daß } I_C > I_L \rightarrow X_C < X_L \rightarrow B_C > B_L,$$

oder

$$\textcircled{*} I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

$$\text{daß } I_L > I_C \rightarrow X_L < X_C \rightarrow B_L > B_C.$$

Für den Gesamtstrom gilt

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_{bl}^2}; \quad (6.30)$$

I_{bl} resultierender Blindstrom.

$$I = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_C}\right)^2},$$

$$I = U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}, \quad (6.31)$$

$$I = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (6.32)$$

Der Gesamtstrom einer Wechselstromparallelschaltung setzt sich aus der geometrischen Summe der Teilströme zusammen.

Hinweis

In Parallelschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen kann der Gesamtstrom kleiner als einzelne Teilströme sein.

Phasenverhältnisse

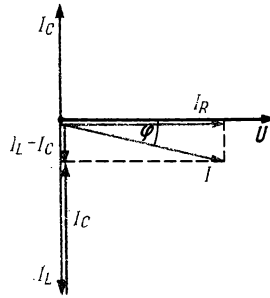


Bild 6.36

Zur Berechnung der Phasenverschiebung

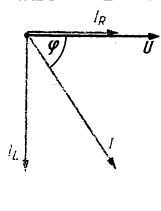
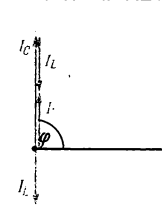
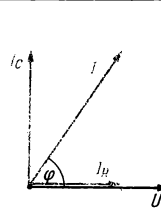
Berechnung der Phasenverschiebung

$$\sin \varphi = \frac{I_L - I_C}{I} \quad \text{oder} \quad \sin \varphi = \frac{B_L - B_C}{Y},$$

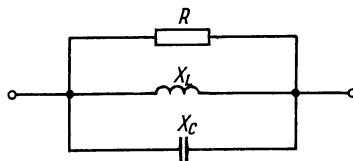
$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} \quad \text{oder} \quad \cos \varphi = \frac{G}{Y},$$

$$\tan \varphi = \frac{I_L - I_C}{I_R} \quad \text{oder} \quad \tan \varphi = \frac{B_L - B_C}{G}.$$

Tafel 6.4. Berechnungsgrundlagen für Wechselstromparallelschaltungen

R und X_L parallel	X_L und X_C parallel	R und X_C parallel
$X_C = \infty \Rightarrow B_C = 0 \Rightarrow I_C = 0$	$R = \infty \Rightarrow G = 0 \Rightarrow I_R = 0$	$X_L = \infty \Rightarrow B_L = 0 \Rightarrow I_L = 0$
		
$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$	$I = I_C - I_L$ $I = I_L - I_C$	$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$
$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$	$Y = B_C - B_L$ $Y = B_L - B_C$	$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$
$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$

Grundtypen von Wechselstrom- parallelschaltungen



Sonderfälle

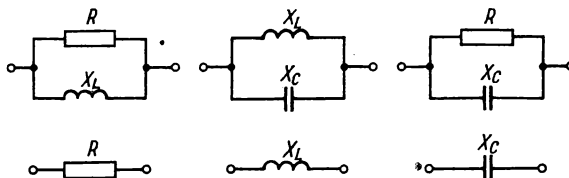


Bild 6.37. Varianten von Wechselstromparallelschaltungen

6.2.1.3. Reale Widerstände, Spulen und Kondensatoren

Reale Wechsel- strombauelemente

Technisch reale Wechselstrombauelemente zeigen neben den ihnen typischen Eigenschaften ohmscher Widerstand, Induktivität und Kapazität störende unerwünschte Nebeneigenschaften (vgl. dazu Abschnitte 4.7. und 5.8.5.).

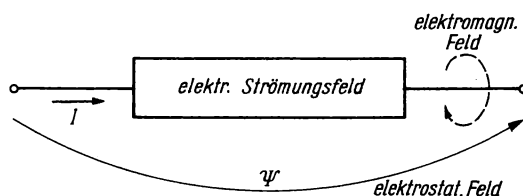


Bild 6.38. Verknüpfung der elektrotechnischen Felder

$I \rightarrow$	Vorhandensein des Strömungsfeldes	$\rightarrow R$
$\Psi \rightarrow$	Vorhandensein des elektrostatischen Feldes	$\rightarrow C$
$\Phi \rightarrow$	Vorhandensein des elektromagnetischen Feldes	$\rightarrow L$

Aus Bild 6.38 kann ein vereinfachter Ersatzschaltplan eines passiven Zweipols angegeben werden (Bild 6.39).

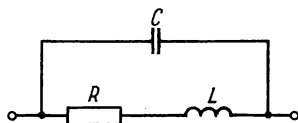


Bild 6.39
Vereinfachter Ersatzschaltplan eines beliebigen passiven Zweipols

Die neben den gewünschten Eigenschaften auftretenden unerwünschten werden technisch vermindert oder können vernachlässigt werden (z. B. im NF-Bereich, in Gleichstromtechnik).

In den Abschnitten 5.3. und 5.8. wurde gezeigt, daß

- jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umwirbelt wird,
- bei Flußänderungen Selbstinduktionsvorgänge auftreten.

Skineffekt
[skin (engl.)
Haut, Deckfläche]

Bei sehr schnellen Änderungen des Magnetflusses (z. B. bei Hochfrequenz) wird der Strom an die Oberfläche des Leiters verdrängt, weil im Inneren die Selbstinduktionsurspannung höhere Werte erreicht als an der Oberfläche des Leiters. Diese Erscheinung wird als Skin-effekt bezeichnet.

Hinweis

Verwendung von Hohlleitern in der Höchstfrequenztechnik.

Es wird definiert:

Der Widerstand, der den Skineffekt einschließt, ist ein Wirkwiderstand.

Es sind zu unterscheiden:

Reale Wirkwiderstände

- niederohmige Wirkwiderstände

Wegen der relativ geringen Spannungsabfälle gilt

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \omega L \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- hochohmige Wirkwiderstände

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \\ \omega L \ll R \end{array} \right\} \begin{array}{l} \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

Reale induktive Blindwiderstände

- geringe Induktivitäten (eisenlose Spulen)

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \gg R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} R \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- große Induktivitäten (Eisendrosselspulen)

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \gg R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} R \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

Spulengüte

Für reale Spulen wird die Spulengüte angegeben:

$$\tan \delta_L = \frac{R}{\omega L} . \quad (6.33)$$

Reale kapazitive Blindwiderstände

- geringe Kapazität

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll R \\ \frac{1}{\omega C} \gg R \end{array} \right\} \begin{array}{l} R \text{ und } \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- große Kapazität

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \approx 0 \\ \frac{1}{\omega C} \gg R \end{array} \right\} \begin{array}{l} R \text{ und } \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

Verlustfaktor

Für reale Kondensatoren wird der Verlustfaktor definiert:

$$\tan \delta_C = \frac{1}{R \omega C} . \quad (6.34)$$

Reale Grundbauelemente des Wechselstromkreises sind stets verlustbehaftet. Das elektrische Verhalten realer Bauelemente lässt sich durch eine Schaltkombination idealer Grundbauelemente beschreiben.

6.2.2. Leistung und Energie in Wechselstromkreisen

Die umgesetzte Leistung in einem Wechselstromkreis ist aus der Spannung und dem Strom definierbar:

Leistungsarten im Wechselstromkreis

Wirkleistung

Formelzeichen

P

Physikalischer Zusammenhang

$$P = U_R I = I_R U \quad (6.35)$$

Einheit

$$[P] = 1 \text{ W}$$

Wirkleistung ist diejenige Leistung des Generators, die tatsächlich an den Betriebsmitteln nutzbar wird (z.B. Wärme, mechanische Leistung).

Blindleistung

Formelzeichen

Q

Physikalischer Zusammenhang

$$Q = U_{bl} I = I_{bl} U \quad (6.36)$$

Einheit

$$\text{Var (Volt-Ampere - reaktiv)} \\ [Q] = 1 \text{ var}$$

Blindleistung ist die für den Aufbau elektromagnetischer und elektrostatischer Felder benötigte Leistung.

Scheinleistung

Formelzeichen

S

Physikalischer Zusammenhang

$$S = U I = I U \quad (6.37)$$

Einheit

$$[S] = 1 \text{ V A}$$

$$S^2 = P^2 + (Q_L - Q_C)^2$$

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (6.38)$$

Weiterhin kann definiert werden:

Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (6.39)$$

Blindfaktor

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad (6.40)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (6.41)$$

Energieumsatz im Wechselstromkreis

Wirkarbeit

$$W_w = U I t \cos \varphi \quad (6.42)$$

Blindarbeit

$$W_{bl} = U I t \sin \varphi \quad (6.43)$$

Scheinarbeit

$$W_s = U I t \quad (6.44)$$

Hinweis

In Wechselstromkreisen ist es von hoher volkswirtschaftlicher Bedeutung, den Anteil der Wirkarbeit an der Scheinarbeit wesentlich zu erhöhen.

Wirkleistung

$$P = U I \cos \varphi \quad (6.45)$$

Blindleistung

$$Q = U I \sin \varphi \quad (6.46)$$

Scheinleistung

$$S = U I \quad (6.47)$$

6.2.3. Elektrische Schwingkreise

Begriffsbestimmung
„elektrischer
Schwingkreis“

Verknüpfung von Wechselstromwiderständen, die eine ständige Energiependelung von Blindenergie des elektromagnetischen und elektrostatischen Feldes nach ein- oder mehrmaliger Zufuhr von Energie garantiert.

Derartige Schaltungen sind LC-Schwingkreise.

Wird ein Schwingkreis mit seiner Eigenfrequenz erregt (bauelementeabhängig), treten große Amplituden von Spannung oder Stromstärke auf. Man spricht in diesem Fall von Resonanz.

6.2.3.1. Reihenschwingkreise

Resonanzfall und
Resonanzbedingung

Bei Resonanzfrequenz gilt

$$U_L = U_C ;$$

$$I X_L = I X_C ,$$

$$I \omega_r L = I \frac{1}{\omega_r C} ,$$

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} ,$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC} ,$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} ,$$

Thomsonsche
Schwingungs-
gleichung
[Sir William Thom-
son (1892 Lord Kel-
vin), 1824-1907,
englischer Physiker]

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}}$$

(6.48)

Resonanzfrequenz

Frequenz, bei der induktiver und kapazitiver Blindwiderstand gleich groß sind.

Nur in diesem Fall kann eine Energiependelung zwischen den Blindschaltelementen stattfinden.

Die Größe der Resonanzfrequenz des Kreises ist von den Bemessungsgrößen von Spule und Kondensator abhängig.

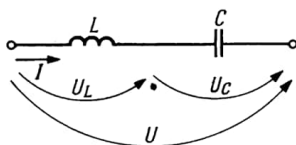
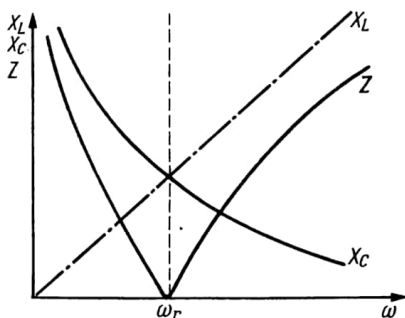


Bild 6.40
Idealer Reihenresonanzkreis

Bild 6.41
Widerstandsverläufe im idealen
Reihenresonanzkreis



Idealer Reihen-
schwingkreis

Ein idealer Reihenschwingkreis benötigt zu seinem Betrieb keine Energie, denn

$$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2},$$

$$Z = X_L - X_C.$$

Wegen $X_L = X_C$ gilt bei Resonanz

$$\begin{aligned} Z &\rightarrow 0 \rightarrow U \rightarrow 0 \\ &\rightarrow I \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Ein idealer Reihenresonanzkreis wirkt stromüberhöhend. Man spricht von einem Saugkreis.

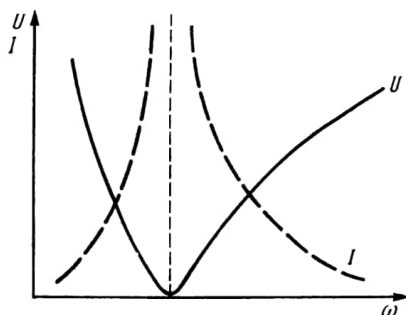


Bild 6.42
Strom- und Spannungsverlauf beim
idealen Reihenresonanzkreis

Realer Reihen-schwingkreis

In der Praxis sind alle Reihenschwingkreise verlustbehaftet, z.B. durch den Wirkwiderstand von Spulen, durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle.

Damit ergeben sich folgende Beziehungen:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Wegen $X_L = X_C$ bei Resonanzfrequenz gilt

$$Z = \sqrt{R^2 + (0)^2},$$

$$Z = R.$$

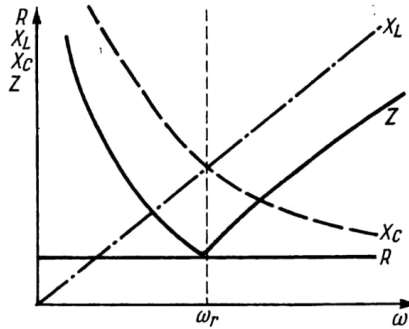


Bild 6.43
Widerstandsverläufe im realen Reihenschwingkreis

Verhalten bei Resonanz

Ein realer Reihenresonanzkreis verhält sich bei der Resonanzfrequenz wie ein Wirkwiderstand.

Damit fließt in den Zuleitungen des Kreises nur Wirkstrom, der von der Größe des Wirkwiderstandes abhängt.

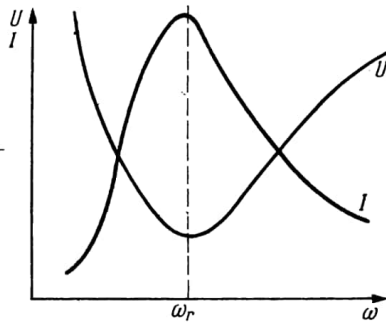


Bild 6.44
Strom- und Spannungsverlauf beim realen Reihenresonanzkreis

Kenngrößen von Reihenresonanzkreisen

In der Hochfrequenztechnik kommt es auf ausgeprägte Resonanzeigenschaften an.

Kreisgüte

Formelzeichen

Q

Physikalischer Zusammenhang

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}$$

(6.49)

$$Q = \frac{I X_L}{I Z} = \frac{I X_C}{I Z}$$

Bei Resonanz gilt $Z = R$,

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R}.$$

Mit Gl. (6.48) ergibt sich

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6.50)$$

Die Kreisgüte wird um so besser, je geringer der Wirkwiderstand des Kreises, je größer die Kreisinduktivität und je kleiner die Kapazität des Resonanzkreises ist.

Dämpfung

Formelzeichen

d

Physikalischer Zusammenhang

$$d = \frac{1}{Q}$$

(6.51)

$$d = R \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}};$$

$$d = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Die Dämpfung von Reihenresonanzkreisen wird geringer, wenn

- der Wirkwiderstand kleiner,
- die Kreiskapazität geringer,
- die Kreisinduktivität größer wird.

6.2.3.2. Parallelschwingkreise

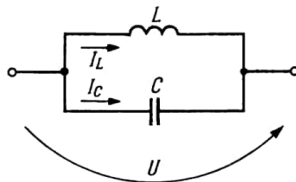


Bild 6.45
Idealer Parallelresonanzkreis

Resonanzfall und Resonanzbedingung

Bei Resonanzfrequenz gilt

$$I_L = I_C.$$

Thomsonsche Schwingungsgleichung

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

(6.52)

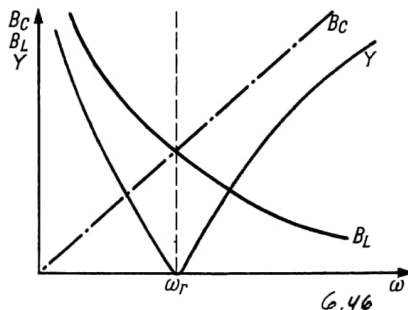


Bild 6.46
Leitwertverläufe im idealen Parallelresonanzkreis

Idealer Parallel- schwingkreis

Ein idealer Parallelschwingkreis benötigt zu seinem Betrieb keine Energie, denn

$$Y = \sqrt{(B_L - B_C)^2},$$

$$Y = B_L - B_C.$$

Da $B_L = B_C$, ist Y bei Resonanz Null.

$$Y \rightarrow 0 \Rightarrow Z \rightarrow \infty \Rightarrow I \rightarrow 0 \\ \Rightarrow U \rightarrow \infty$$

Ein idealer Parallelresonanzkreis wirkt stark stromvermindernd. Dieses Verhalten kennzeichnet einen Sperrkreis.

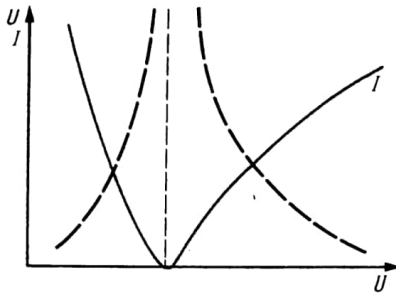


Bild 6.47
Strom- und Spannungsverlauf
beim idealen Parallelresonanz-
kreis

Realer Parallel- schwingkreis

In der Praxis sind alle Parallelschwingkreise verlustbehaftet.

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

Mit $B_L = B_C$ bei Resonanzfrequenz gilt

$$Y = G.$$

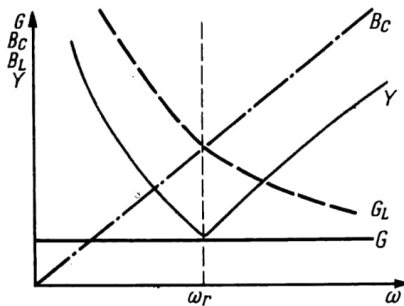


Bild 6.48
Leitwertverläufe im realen
Parallelschwingkreis

Verhalten bei Resonanz

Ein realer Parallelresonanzkreis verhält sich bei der Resonanzfrequenz wie ein Wirkleitwert.

Auf den Zuleitungen zum Schwingkreis fließt nur Wirkstrom, der von der Größe des Wirkwiderstandes abhängig ist.

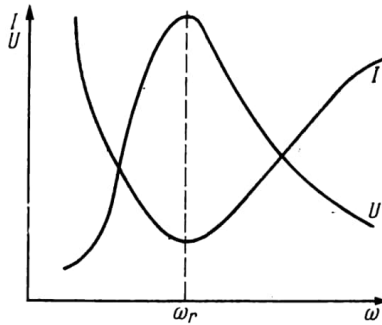


Bild 6.49
Strom- und Spannungsverlauf beim
realen Parallelresonanzkreis

Kenngrößen von
Parallel-
resonanzkreisen

Kreisgüte

$$Q = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} \quad (6.53)$$

$$Q = \frac{U_B L}{U_Y} = \frac{U_B C}{U_Y}$$

Bei Resonanz ergibt sich $Y = G$,

$$Q = \frac{R}{\omega_r L} = \omega_r C R.$$

Damit entsteht

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (6.54)$$

Dämpfung

Die Dämpfung des Schwingkreises ergibt sich mit

$$d = \frac{1}{Q} \quad [\text{Gl. (6.51)}] \quad \text{zu}$$

$$d = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6.55)$$

Ein Parallelschwingkreis wird nur gering bedämpft, wenn der Wirkwiderstand des Kreises sehr hoch ist.

6.2.3.3. Einfluß des Generatorinnenwiderstandes auf die Eigenschaften elektrischer Schwingkreise

In den bisherigen Ausführungen wurden im wesentlichen die schwingfähigen Schaltungen untersucht, nicht aber die speisenden Generatoren.

Aus den Abschnitten 3.5.1. und 3.5.2. ist bekannt, daß jede Spannungs- oder Stromquelle einen inneren Widerstand R_i aufweist. Der Schwingkreis übernimmt die Aufgabe des Außen- oder Arbeitswiderstandes R_a .

Niederohmige
Speisung von
Reihen-
schwingkreisen

Reihenschwingkreise haben bei Resonanzfrequenz einen sehr geringen Widerstand, d.h. hoher Stromfluß an der Resonanzstelle (Annäherung an den Kurzschlußfall). Daraus ergibt sich, daß, wenn der Reihenschwingkreis eine gewünschte Stromüberhöhung erreichen soll, die Speisespannung konstant sein muß. Deshalb kann nur eine Konstantspannungsquelle mit sehr geringem Innenwiderstand den Schwingkreis speisen.

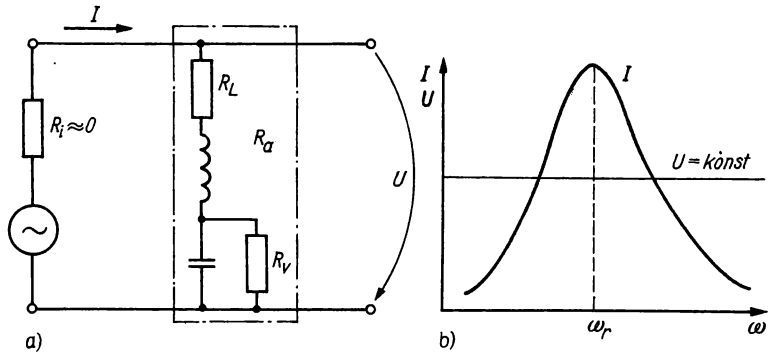


Bild 6.50. Reihenschwingkreis bei niederohmiger Speisung
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Reihenschwingkreises
b) Strom- und Spannungsverlauf

Hochohmige
Speisung von
Reihen-
schwingkreisen

Wird ein Schwingkreis von einer hochohmigen Stromquelle mit konstantem Strom gespeist, bricht an der Resonanzstelle die Spannung über dem Schwingkreis zusammen. Dieser Effekt ist erwünscht, wenn bestimmte Frequenzen unterdrückt werden sollen (z.B. die „9-kHz-Sperre“ für eng benachbarte Sendestationen bei AM-Empfang).

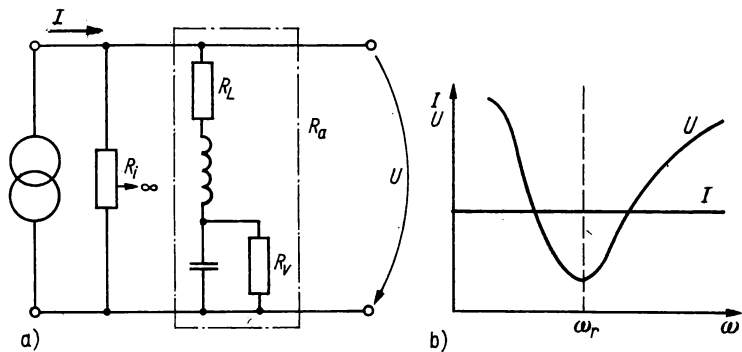


Bild 6.51. Reihenschwingkreis bei hochohmiger Speisung
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Reihenschwingkreises
b) Strom- und Spannungsverlauf

Hochohmige
Speisung von
Parallel-
schwingkreisen

Parallelschwingkreise haben bei Resonanzfrequenz einen sehr hohen Widerstand. An der Resonanzstelle tritt eine Spannungsüberhöhung auf (Annäherung an den Leerlauf), wenn der Kreis mit einem konstanten Strom gespeist wird, den ein hochohmiger Generator liefert.

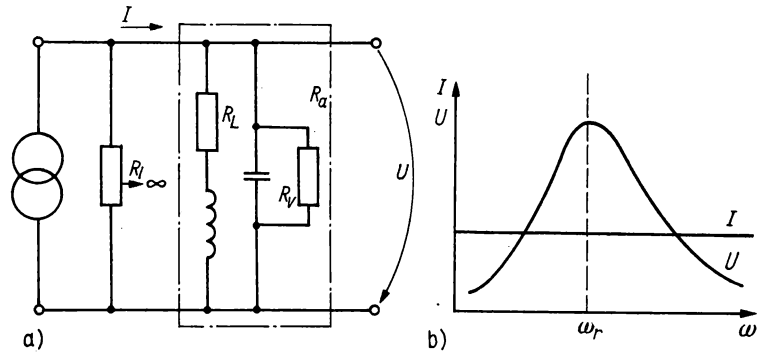


Bild 6.52. Parallelschwingkreis bei hochohmiger Speisung
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Parallelschwingkreises
b) Strom- und Spannungsverlauf

Niederohmige
Speisung von
Parallel-
schwingkreisen

Wird ein Parallelschwingkreis aus einer Spannungsquelle mit geringem Innenwiderstand gespeist, ist der Strom an der Resonanzquelle sehr gering. Dieser Effekt wird technisch genutzt bei der Phasenkompensation in der Leistungselektrotechnik (vgl. Abschnitt 6.2.3.4.).

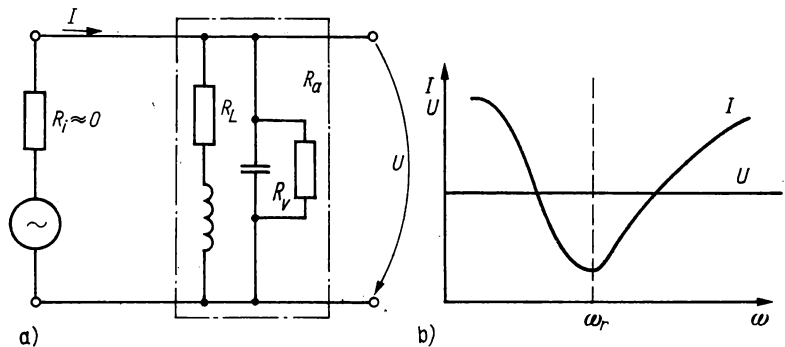


Bild 6.53. Parallelschwingkreis bei niederohmiger Speisung
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Parallelschwingkreises
b) Strom- und Spannungsverlauf

Praxisgerechte
Bemessung von
Schwingkreis-
schaltungen

In der Praxis kann mit Etwa-Richtwerten gearbeitet werden, weil sich Quellen mit unendlich kleinem bzw. mit unendlich großem Innenwiderstand technisch nicht realisieren lassen.

Es gilt:

$$\text{hochohmige Speisung} \quad \frac{R_i}{R_a} \approx \frac{10 \dots 20}{1}$$

$$\text{niederohmige Speisung} \quad \frac{R_i}{R_a} \approx \frac{1}{10 \dots 20}$$

Bei der Berechnung von Schwingkreisen muß also der Einfluß des Quelleninnenwiderstandes auf die Dämpfung und die Kreisgüte berücksichtigt werden (vgl. Abschnitte 6.2.3.1. und 6.2.3.2.).

6.2.3.4. Kompensation von Blindleistungen

Induktive Betriebsmittel (Motoren, Transformatoren, Drosseln) und kapazitive Betriebsmittel belasten mit ihrem Blindstrom die Netze erheblich, ohne daß nach außen wirksame Energie umgesetzt wird.

Tafel 6.5. Technische Richtwerte für Größenordnungen des Leistungsfaktors

Ausgewählte Betriebsmittel	Leistungsfaktor $\cos \varphi$
Leerlaufende Transformatoren	0,1 ... 0,4
Leerlaufende Ws-Motoren	0,3 ... 0,6
Gasentladungsstrahler mit Vorschalt-drosseln (unkompensiert)	0,5
Einphasen-Ws-Motoren (belastet)	0,65
Drehstrommotoren (belastet)	0,8 ... 0,9
Transformatoren (belastet)	0,85 ... 0,99
Halbleiterschweißgleichrichter	0,5 ... 0,7
Glühlampen und Elektrowärme-geräte mit Widerstandserwärmung	1

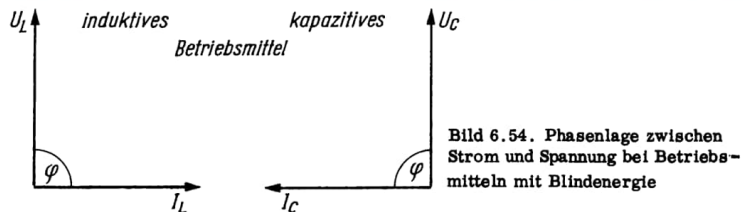
Aus den in der Tafel 6.5 zusammengestellten technischen Richtwerten wird ersichtlich, daß volkswirtschaftlich die Notwendigkeit besteht, Maßnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors durchzuführen. Die erforderliche Blindleistung zum Aufbau elektromagnetischer Felder (besonders der erstgenannten Betriebsmittelgruppe) bedeutet:

- Verschlechterung des Leistungsfaktors,
- Verlegung größerer Leiterquerschnitte,
- schlechte Auslastung der elektrischen Anlagen.

Hinweis

In der Volkswirtschaft als Hauptanwender von Elektroenergie treten vorwiegend induktive Blindleistungen (induktive Betriebsmittel) auf.

Induktiver Blindstrom kann durch kapazitiven Blindstrom kompensiert (ausgeglichen) werden.



Prinzip der Phasenkompensation

In Industrieanlagen muß die vorhandene induktive Blindleistung direkt am Entstehungsort kompensiert werden (z.B. am Betriebsmittel selbst, am Werkhallennetz, am gesamten Betriebsnetz).

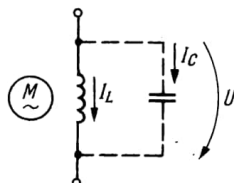


Bild 6.55
Phasenkompensation am Entstehungsort

Kompensationsarten

- Einzelkompensation
Das einzelne Betriebsmittel mit Blindleistung wird kompensiert (z.B. Einzelantriebe).
- Gruppenkompensation
Mehrere Betriebsmittel mit Blindleistung werden gemeinsam kompensiert (z.B. Werkhallen).
- Zentralkompensation
Das gesamte Betriebsnetz wird kompensiert.

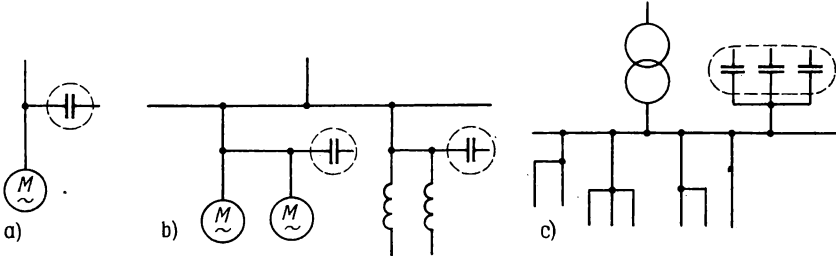


Bild 6.56. Arten der Kompensation induktiver Blindleistung
a) Einzelkompensation; b) Gruppenkompensation; c) Zentralkompensation

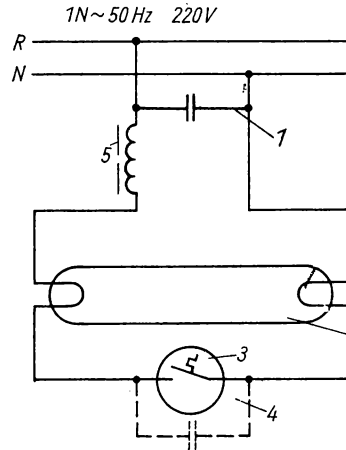
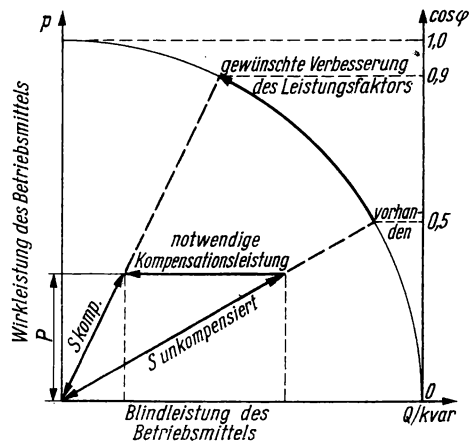


Bild 6.57
Beispiel einer Einzelkompensation (Niederspannungs-Leuchtstofflampe)
1 Kompensationskondensator; 2 Leuchtstofflampe; 3 Starter; 4 Entstörkondensator; 5 Vorschaltgerät (Drossel)

Methoden zur Ermittlung der notwendigen Kompensationsblindleistung

Grafische Ermittlung

Bild 6.58. Ermittlung der Kompensationsleistung mit dem $\cos \varphi$ -Kreis



Rechnerische Ermittlung

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)^2 - P^2}$$

Die vorhandene Blindleistung muß auf zulässige Werte reduziert werden.

$$Q_{\text{Kompensation}} = Q_{\text{vorhanden}} - Q_{\text{zulässig}}$$



notwendige Kompensationsblindleistung

$$Q_{\text{komp}} = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi_{\text{vorh}}}\right)^2 - P^2} - \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi_{\text{gewünscht}}}\right)^2 - P^2} \quad (6.56)$$

Bestimmung der
Kompensations-
kapazität

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C = U^2 2\pi f C$$



$$C_{\text{notwendig}} = \frac{Q_C}{2\pi f U^2} \quad (6.57)$$

Bei der Berechnung von Kompensationsblindleistungen ist natürlich auch entsprechend den mathematischen Beziehungen für die Parallelschaltung von L und C die Gleichung

$$Q_C = P(\tan \varphi_{\text{vorhanden}} - \tan \varphi_{\text{gewünscht}})$$

anwendbar.

Gesetzlich vor-
geschriebener
Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = 0,950$$

Für die Bemessung der Kompensationsanlagen bestehen zwei grundsätzliche Ausgangspositionen:

- höhere Wirkleistungsübertragung bei konstanter Scheinleistung,
- verringerter Scheinleistungsbedarf bei konstanter Wirkleistung.

Hinweis

In der volkswirtschaftlichen Praxis werden Leistungsfaktoren in der Größenordnung $0,85 \leq \cos \varphi \leq 0,95$ erreicht, wenn die Anlagen richtig kompensiert werden.

Ein sehr guter Leistungsfaktor bringt einen hohen ökonomischen Nutzen:

- volle Auslastung von Netzen und Anlagen,
- Entlastung der Leitungen,
- Verringerung der Verluste,
- Materialeinsparung,
- Kostenreduzierung,
- Erhaltung von Energie.

6.2.4. Zusammenschaltung von Wechselspannungsquellen

Wie alle aktiven Zweipole können Wechselspannungsquellen zusammengeschaltet werden.

- Reihenschaltungen
mit dem Ziel, höhere Spannungen als die einer Spannungsquelle zu erreichen
oder Spannungen zu mischen, um bestimmte Spannungsformen zu erzielen.
- Parallelschaltungen
mit dem Ziel, höhere Stromstärken, als eine Spannungsquelle zu erbringen vermag, zu erreichen.

Bestimmungsgrößen

- Scheitelwert \hat{E}
- Frequenz
- Phasenlage

Grundsaltungen

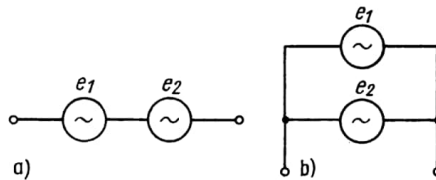


Bild 6.59
Zusammenschaltung von Wechselspannungsquellen
a) Reihenschaltung
b) Parallelschaltung

Reihenschaltung

Für die Einzelurspannung(en) gilt

$$e_{1,2} = \hat{E}_{1,2} \sin(\omega t_{1,2} + \varphi_{1,2})$$

Damit können für gleiche Frequenzen von in Reihe zu schaltenden Urspannungsquellen drei Grundfälle angegeben werden:

gleiche Phasenlage

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\omega_1 = \omega_2$$

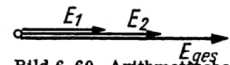


Bild 6.60. Arithmetische Addition von Urspannungen gleicher Phasenlage

ungleiche Phasenlage

$$\varphi_1 \neq \varphi_2$$

$$\omega_1 = \omega_2$$

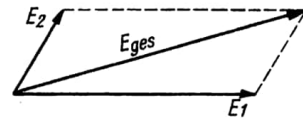


Bild 6.61
Geometrische Addition von Urspannungen ungleicher Phasenlage

unterschiedliche Frequenz

$$\omega_1 \neq \omega_2$$

Dabei sind folgende Fälle von Bedeutung:

$$\omega_1 \gg \omega_2,$$

$$\omega_1 \approx \omega_2,$$

$$\omega_1 = n \omega_2 \text{ (für } n = 2, 3, 4, \dots, k).$$

Überlagerung

$$\omega_1 \gg \omega_2$$

Sind die Frequenzen von in Reihe geschalteten Wechselspannungsquellen stark unterschiedlich, entstehen Überlagerungen (in Hochfrequenztechnik von Bedeutung).

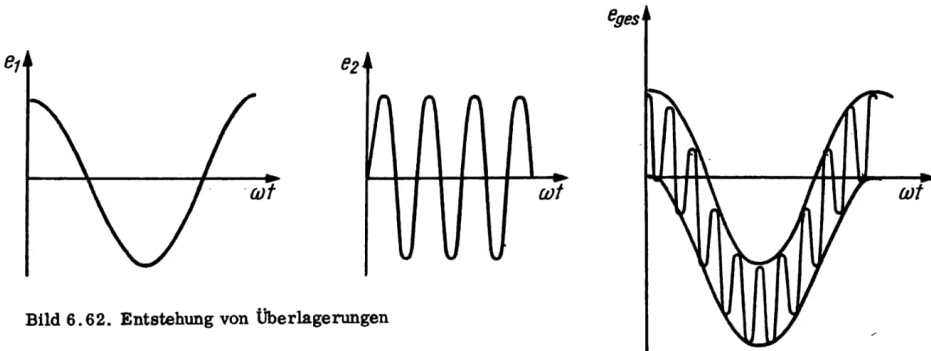


Bild 6.62. Entstehung von Überlagerungen

Schwebung

$$\omega_1 \approx \omega_2$$

Sind die Frequenzen von in Reihe geschalteten Wechselspannungsquellen etwa gleich groß, entstehen Schwebungen.

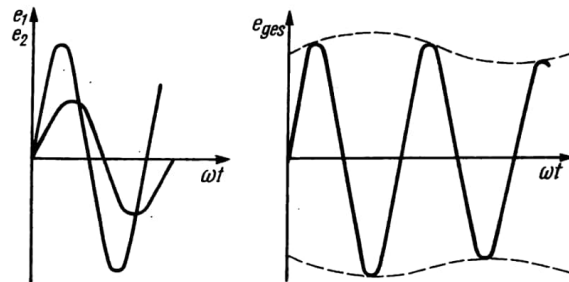


Bild 6.63. Entstehung von Schwebungen

Dabei treten Spannungsüberhöhungen auf. Diese Fälle sind besonders in Netzen mit technischem Wechselstrom (50 Hz, 16 2/3 Hz) gefährlich.

$$\omega_1 = n \omega_2$$

Treten bei Reihenschaltungen von Wechselspannungsquellen bei einer Spannungsquelle ganzzahlige Vielfache der Frequenz der anderen Spannungsquelle auf, entstehen nichtsinusförmige Schwingungen.

Beispiele: Eisendrosseln, Gleichrichterbauelemente

Parallelschaltung

Es ist zu beachten, daß schon bei geringen Abweichungen der Ursprungswerte große Ausgleichsströme fließen können. Deshalb müssen bei Parallelschaltungen von Wechselspannungsquellen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- gleiche Urspannungen (Verhinderung von Ausgleichsströmen),
- gleiche Strombelastbarkeit (Verhinderung der Überlastung einer Spannungsquelle),
- gleiche Phasenlage (Verhinderung von Ausgleichsströmen).

Beispiele: Parallelschaltungen der Sekundärwicklungen von Transformatoren oder von Wechselspannungsgeneratoren in Kraftwerken.

6.3. Mehrphasige Wechselspannungen und Wechselströme

Die Nutzung sinusförmiger Wechselspannungen erbringt eine Reihe von technischen und ökonomischen Vorteilen. Die Erzeugung sinusförmiger Wechselspannungen in rotierenden Einphasengeneratoren hat jedoch den Nachteil, daß nicht der gesamte zur Verfügung stehende Wickelraum voll genutzt werden kann.

Deshalb wurden ab etwa 1850 technische Lösungen erarbeitet, die mehrere getrennte Erzeugerwicklungen mit einem gemeinsamen Erregerkreis zum Mehrphasengenerator vereinen.

6.3.1. Erzeugung mehrphasiger Wechselspannungen

Zweiphasen- wechselspannung

Zwei Spulen (bzw. vier Halbspulen) werden räumlich um 90° versetzt auf dem Umfang eines gemeinsamen Ständereisenkreises angeordnet.

Mit Hilfe eines rotierenden Elektromagneten (Polrad) werden in diesen Wicklungen zeitlich um 90° phasenverschobene Urspannungen gleicher Amplitude und gleicher Frequenz induziert.

Diese können direkt an den Wicklungen abgenommen werden.

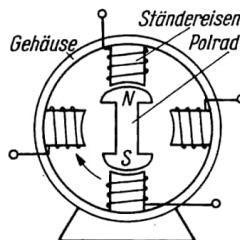


Bild 6.64
Prinzip des Zweiphasenwechselspannungsgenerators

Für die erzeugten Urspannungen gilt

$$e_1 = \hat{E}_1 \sin \omega t,$$

$$e_2 = \hat{E}_2 \sin (\omega t - 90^\circ).$$

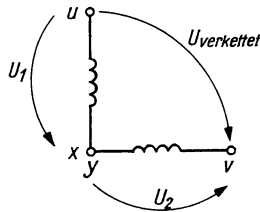


Bild 6.65
Prinzip der Verkettung im Zweiphasenwechselspannungsgenerator

Durch Zusammenschaltung der Einzelspannungen entsteht eine Gesamtspannung.

Es gilt

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2},$$

$$U = \sqrt{2} U_1,$$

$$U = \sqrt{2} U_1.$$

Zweiphasenwechselspannungen haben heute kaum noch technische Bedeutung (veraltete Ortsnetze).

Die Gesetzmäßigkeiten der Verknüpfung zweier phasenverschobener Wechselspannungen sind jedoch für die Messtechnik und in der Niederfrequenztechnik von Bedeutung.

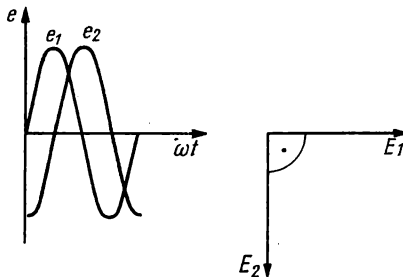


Bild 6.66
Zweiphasenwechselspannung

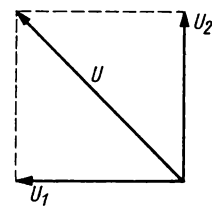


Bild 6.67. Verkettung von Spannungen

Dreiphasenwechselspannung („Drehstromspannung“)

Werden in einem Wechselspannungsgenerator drei Spulen räumlich um 120° verschoben über den Umfang eines gemeinsamen Ständerkreises verteilt, so induziert ein rotierender (Elektro-)Magnet in den Spulen drei jeweils zeitlich um 120° verschobene Urspannungen.

Dieses Prinzip wurde 1885 erstmalig von Ferraris angegeben. (Galileo Ferraris, 1847-1897, italienischer Physiker und Elektrotechniker)

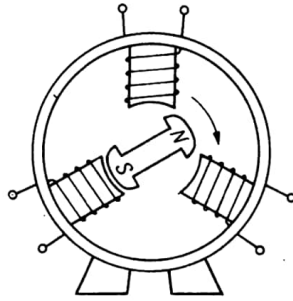


Bild 6.68
Prinzip des Dreiphasenwechselspannungs-
generators

Für die erzeugten Urspannungen gilt

$$e_1 = \hat{E}_1 \sin \omega t,$$

$$e_2 = \hat{E}_2 \sin (\omega t - 120^\circ),$$

$$e_3 = \hat{E}_3 \sin (\omega t - 240^\circ).$$

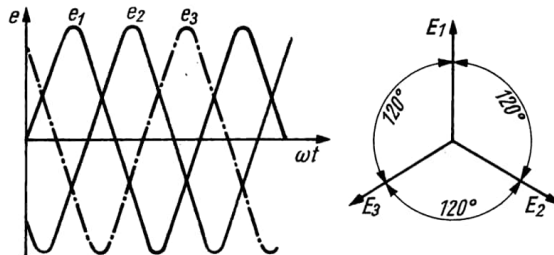


Bild 6.69. Dreiphasenwechselspannung

Die Summe der Spannungen im Dreiphasensystem ist in jedem Augenblick gleich Null.

Offenes
Dreiphasensystem

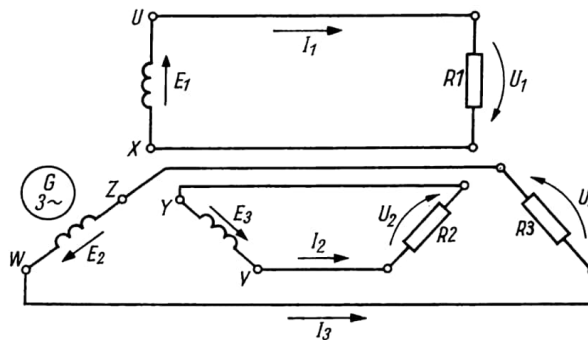


Bild 6.70. Offenes Dreiphasensystem

Beim offenen Dreiphasensystem sind an jeder Wicklung des Generators je ein oder mehrere Betriebsmittel angeschlossen.

Nachteile offener
Dreiphasensysteme

Bei Übertragung der Spannungen über große Entfernungen bedeutet das

- sechs Leitungen (Hin- und Rückleiter),
- hoher Materialaufwand,
- hohe Kosten.

6.3.2. Verkettung mehrphasiger Wechselspannungen

Verkettung von
Gleichspannungen
(vgl.
Abschn. 3.3.2.2.)

Gleichsinnige
Zusammenschaltung

Unter Verkettung von Spannungsquellen versteht man deren Zusammenschaltung.

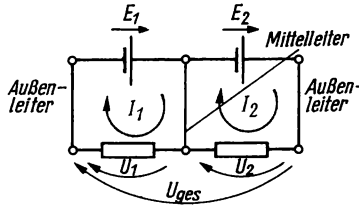


Bild 6.71
Gleichsinnige Zusammenschaltung von
Gleichspannungsquellen
(Gleichstrom-Dreileiter-System)

$$\begin{aligned} \text{Mittelleiterstrom } I_M &= I_1 - I_2 \\ E_{\text{ges}} &= E_1 + E_2 \end{aligned}$$

Vorteile: insgesamt drei Spannungen abnehmbar; zwei Spannungen unterschiedlicher Größe.

Gegensinnige
Zusammenschaltung

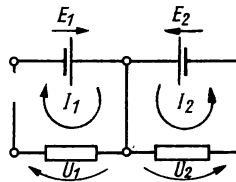


Bild 6.72
Gegensinnige Zusammenschaltung von Gleichspannungsquellen

$$\begin{aligned} \text{Mittelleiterstrom } I_M &= I_1 + I_2 \\ E_{\text{ges}} &= E_1 - E_2 \end{aligned}$$

Verkettung von
Dreiphasen-
wechselspannungen

Zusammenschaltungen von Wechselspannungsquellen sind ebenfalls möglich.

Dabei gelten gleiche mathematische und physikalische Zusammenhänge.

Sternschaltung

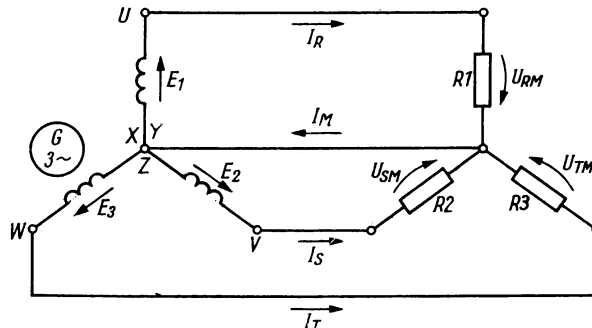


Bild 6.73. Drehstrom-Sternschaltung

Begriffe für
verkettete
Spannungssysteme

Bei der Sternschaltung werden die Spulenenden X, Y, Z des Generators zusammengeschaltet und als Mittelleiter zum gemeinsamen Mittelpunkt der Betriebsmittel geführt. Die Außenleiter R, S, T werden von den Spulenanschlüssen abgenommen.

Außen- oder Hauptleiter (stromführende Leiter) sind Leiter, die nicht vom Mittel- oder Sternpunkt abgehen.

Mittelleiter (bedingt stromführende Leiter) sind Leiter, die vom Mittel- oder Sternpunkt abgehen.

- Sternpunktleiter
- neutraler Leiter (andere Bezeichnungen für einen Mittelleiter)
- Nulleiter (N) (unmittelbar am Sternpunkt geerdeter Mittelleiter bei der Schutzmaßnahme Nullung)

Verkettete Spannung

Spannung zwischen den Außenleitern eines verketteten Spannungssystems (Außenleiterspannung)

- Dreiecksspannung (da hier kein Mittelleiter vorhanden)

Sternspannung

Spannung über einer Wicklung (Strang); Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt

- in Sonderfällen Außenleiter - Erde - Spannung

Für die Ströme gelten:

Außenleiterstrom

Strom auf Außen- oder Hauptleitern

Verketteter Strom

Strom bei Dreieckschaltungen

Berechnung von
Sternschaltungen

Für die Sternschaltung gilt in jedem Augenblick (Bild 6.74), z.B. bei

$$\begin{aligned}\frac{\pi}{2} &\cong 90^\circ, \\ u_1 &= \hat{U}_1, \\ u_2 &= -\frac{\hat{U}_1}{2}, \\ u_3 &= -\frac{\hat{U}_1}{2}, \\ \Sigma u &= \hat{U}_1 + \left(-\frac{\hat{U}_1}{2}\right) + \left(-\frac{\hat{U}_1}{2}\right),\end{aligned}$$

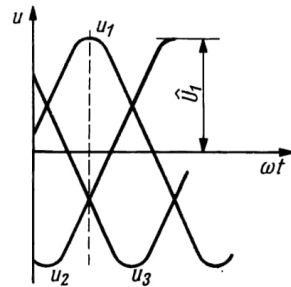


Bild 6.74
Spannungsverläufe im Dreiphasensystem

$$\Sigma u = 0.$$

Ströme in
Sternschaltungen

In der Sternschaltung fließt in jedem Außenleiter der Leiterstrom.

Leiterstrom

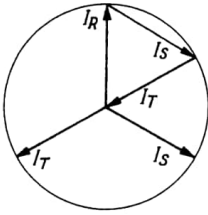
Der Außenleiter oder Hauptleiterstrom in Sternschaltung ist gleich dem Strom in den Generatorwicklungen.

$$I_L = I_A$$

$$(6.58)$$

Mittelleiterstrom

Symmetrische
Belastung des
Sternsystems



Unsymmetrische
Belastung

Für den Strom im Mittelleiter ist zu unterscheiden

$$I_R = I_S = I_T$$

Durch Summenbildung entsteht

$$I_R + I_S + I_T = I_M ;$$

$$I_M = 0 .$$

Verlegung eines Mittelleiters nicht erforderlich

Bild 6.75

Ströme auf den Außenleitern (Summenbildung) bei
symmetrischer Last

$$I_R \neq I_S \neq I_T \text{ (bei } \varphi = 120^\circ \text{ konst.)}$$

$$I_M \neq 0$$

Ausgleichsstrom im Mittelleiter, Verlegung eines Mittelleiters erforderlich.

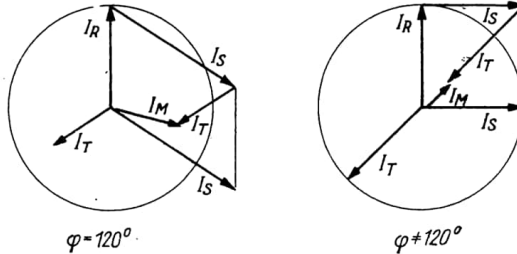


Bild 6.76. Ströme auf den Außenleitern und auf dem
Mittelleiter (Summenbildung) bei unsymmetrischer
Last

Fließt im Mittelleiter ein Ausgleichsstrom, so führt der Mittelleiter bei geerdeten Systemen gegen Erde Spannung!

Deshalb ist auf symmetrische Belastung von Sternsystemen zu achten.

Spannungen in
Sternschaltungen

An der Bildung der Außenleiter- oder Hauptleiterspannung (verkettete Spannung) sind jeweils zwei Sternspannungen beteiligt.

Außenleiterspannung
(verkettete
Spannung)

Durch Differenzbildung entsteht

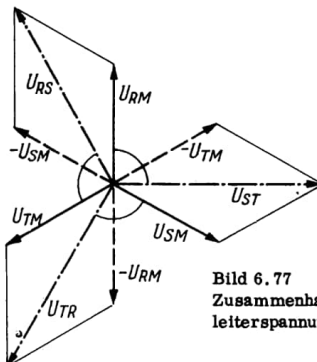


Bild 6.77
Zusammenhang zwischen Stern- und Außenleiterspannungen

Die Leiterspannung zwischen zwei Außenleitern liegt zur Sternspannung des übrigen Außenleiters um 90° phasenverschoben.

Berechnung der
Außenleiterspannung

$$U_L = 2 \cos 30^\circ U_A$$

$$U_L = 2 \frac{1}{2} \sqrt{3} U_A$$

$$U_L = \sqrt{3} U_A$$

(6.59)

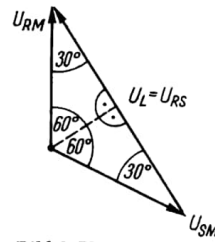


Bild 6.78
Zur Berechnung der Außenleiterspannung

Verkettungsfaktor

$\sqrt{3}$ wird als Verkettungsfaktor bezeichnet!

Dreieckschaltung Δ

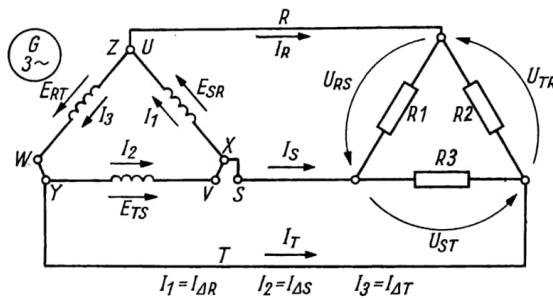


Bild 6.79. Drehstrom-Dreieckschaltung

Spannungen in
Dreieckschaltung

In der Dreieckschaltung ist die Dreiecksspannung genauso groß wie die Leiterspannung.
Es gilt

Leiterspannung

$$U_L = U_\Delta$$

(6.60)

Leiterstrom (verketteter Strom)

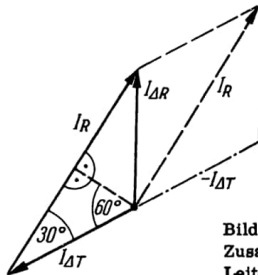


Bild 6.80
Zusammenhang zwischen Dreieckstrom und
Leiterstrom

An der Lieferung des Leiterstromes sind jeweils zwei verkettete Generatorwicklungen beteiligt.

Berechnung des
Leiterstromes

$$I_L = 2 \cos 30^\circ I_\Delta$$

$$I_L = 2 \frac{1}{2} \sqrt{3} I_\Delta$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\Delta$$

(6.61)

6.3.3. Energie und Leistung im Dreiphasensystem

Die gesamte Energie von Dreiphasensystemen setzt sich aus der Energie der einzelnen Teilsysteme zusammen.
Es gilt für die Verkettungsmöglichkeiten:

Energie und
Leistung im
Dreiphasensystem

	λ	Δ
Wirkarbeit	$W_w = 3 U_\lambda I_L t \cos \varphi$	$W_w = 3 U_L I_\Delta t \cos \varphi$
Blindarbeit	$W_{bl} = 3 U_\lambda I_L t \sin \varphi$	$W_{bl} = 3 U_L I_\Delta t \sin \varphi$
Scheinarbeit	$W_s = 3 U_\lambda I_L t$	$W_s = 3 U_L I_\Delta t$
	$U_\lambda = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ $I_\lambda = I_L$	$I_\Delta = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ $U_\Delta = U_L$

Unabhängig von der Verkettungsart gilt

$$W_w = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi t, \quad (6.62)$$

$$\downarrow$$

$$W_w = \sqrt{3} U I \cos \varphi t, \quad (6.63)$$

$$W_{bl} = \sqrt{3} U I \sin \varphi t, \quad (6.64)$$

$$W_s = \sqrt{3} U I t$$

Es lauten die Leistungsbezeichnungen

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi; \quad [P] = 1 \text{ W}, \quad (6.65)$$

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi; \quad [Q] = 1 \text{ var}, \quad (6.66)$$

$$S = \sqrt{3} U I; \quad [S] = 1 \text{ VA}. \quad (6.67)$$

Tafel 6.6. Vergleich der Dreiphasenverkettung

Schaltungsart	Sternschaltung	Dreieckschaltung
Symbol	λ	Δ
Schaltung von Wicklungen		
Leitergrößen	$U_L = \sqrt{3} U_\lambda$ $I_L = I_\lambda$	$I_L = \sqrt{3} I_\Delta$ $U_L = U_\Delta$
Wirkleistung	$P_\lambda = 3 U_\lambda I_L \cos \varphi$ $P_{\lambda, \Delta} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$	$P_\Delta = 3 U_\Delta I_L \cos \varphi$

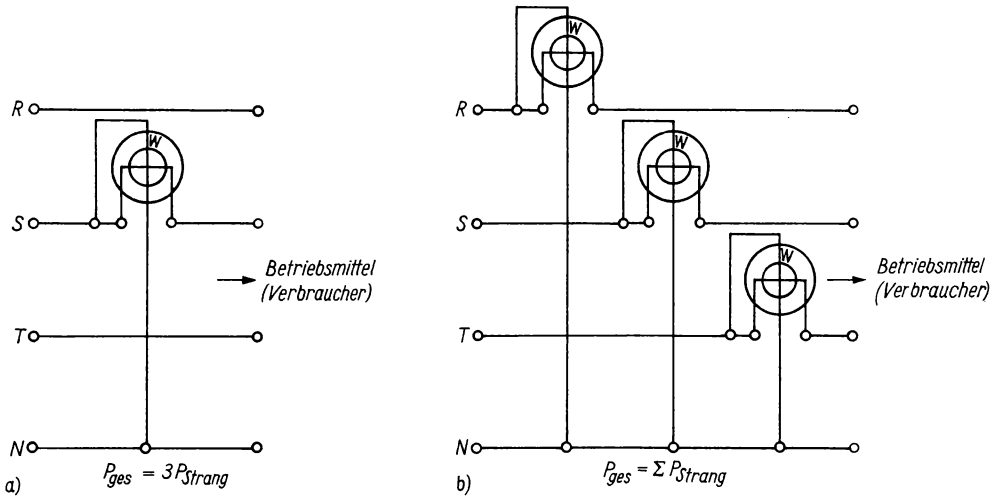


Bild 6.81. Grundsaltung für Wirkleistungsmessungen
a) im symmetrisch belasteten Drehstromnetz; b) im unsymmetrisch belasteten Drehstromnetz

6.3.4. Magnetische Felder bei Dreiphasenwechselstrom

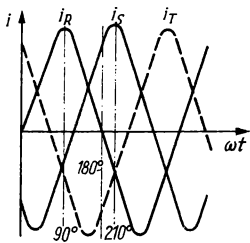


Bild 6.82
Dreiphasenwechselstrom

Aus Abschn. 5.3. ist bekannt, daß jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umwirbelt wird. Das gilt auch für stromdurchflossene Leitungen eines Dreiphasensystems. Da die Summe der Momentanwerte der Ströme und Spannungen bei Dreiphasensystemen in jedem Augenblick Null ist, muß das resultierende Magnetfeld bei unmittelbar parallel verlegten Leitungen auch Null sein. Die Magnetfelder der Einzelleiter heben einander auf. Der Abstand der Einzelleiter spielt dabei eine Rolle. Je größer dieser Abstand wird, desto mehr weicht der Wert der magnetischen Gesamtdurchflutung von Null ab.

Werden die phasenverschobenen Ströme in drei räumlich um 120° verschobene Wicklungen geschickt, entstehen magnetische Gesamtfelder zu verschiedenen Zeitpunkten.

Es wird willkürlich festgelegt:

$$+ \hat{=} \otimes$$

$$- \hat{=} \odot$$

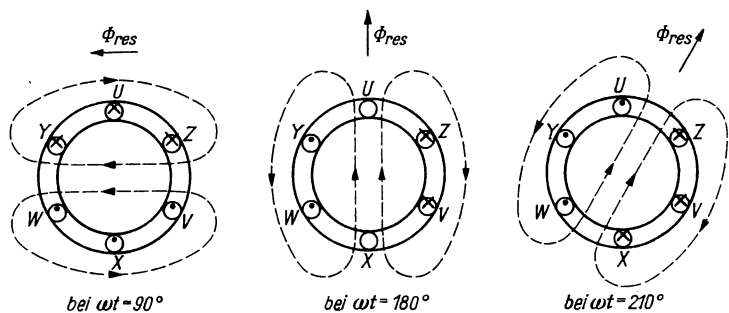


Bild 6.83. Resultierendes Magnetfeld zu verschiedenen Zeitpunkten

Drehfeld

Bei gleichmäßiger Verteilung von Wicklungen über den Umfang eines Weichenzenzylinders entsteht beim Anschluß an ein Dreiphasensystem ein sich drehendes Magnetfeld.

Dieses Magnetfeld ist in der Lage, Permanent- oder Elektromagneten mitzunehmen (Prinzip der Drehstrommotoren).

Auf Grund dieser Erscheinung wird Dreiphasenwechselstrom auch als Drehstrom bezeichnet.

Auch zwei phasenverschobene Wechselströme erzeugen ein sich bewegendes Resultatmagnetfeld.

Die resultierenden Magnetfelder zweier phasenverschobener Ströme bezeichnet man als unvollkommene Drehfelder.

Auf diesem Prinzip basieren verschiedene Wechselstrommotoren (Einphasenmotor mit Hilfswicklung, Induktionszähler).

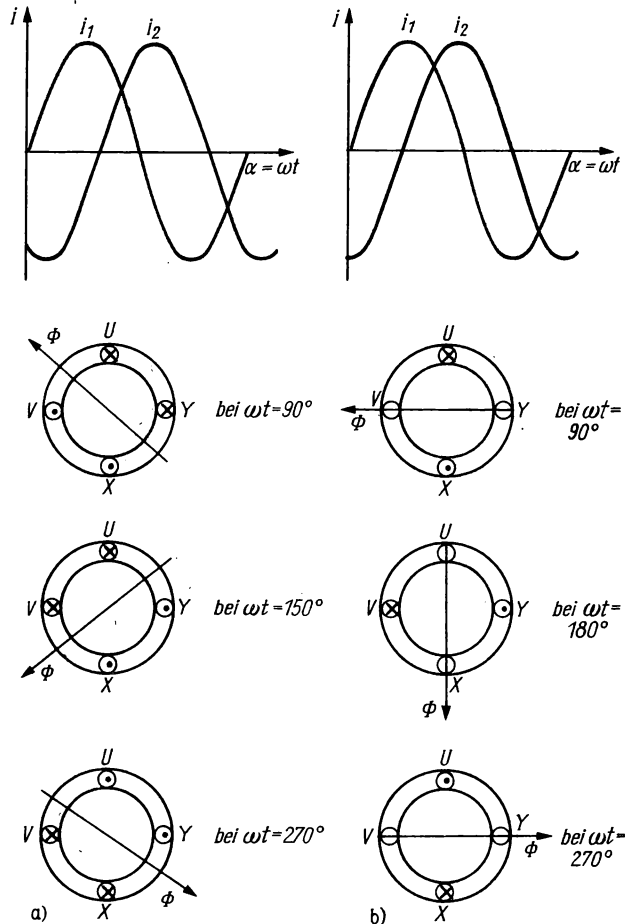


Bild 6.84. Zweiphasenverschobene Wechselströme mit unterschiedlichen Phasenverschiebungswinkeln und Darstellung der entsprechenden Resultatmagnetfelder

a) Phasenverschiebung 120°

b) Phasenverschiebung 90°

7. Anhang

7.1. Verwendete Formelzeichen, Benennungen, Einheiten

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
Allgemeine mathematische Symbole	Δ (Delta)	Differenz, Änderung	-
	k	Konstante, allgemein	-
	m	Anzahl (natürliche Zahl)	-
	n	Anzahl (natürliche Zahl)	-
	Σ (Sigma)	Summenzeichen	-
		Betrag von ...	-
Geometrische Größen	A	Fläche, Querschnitt	1 m ²
	d	Durchmesser eines Kreises	1 m
	h	Höhe	1 m
	l	Länge, Weglänge	1 m
	r	Radius eines Kreises	1 m
	s	Weg, Weglänge, Abstand	1 m
	V	Volumen	1 m ³
Allgemeine physikalische Größen	c	spezifische Wärmekapazität	1 $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	T	Temperatur	1 K
	η (Eta)	Wirkungsgrad	-
	F	Kraft	1 N = 1 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
	G	Gewichtskraft	1 N = 1 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
	g	Fallbeschleunigung	1 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
	M	Moment	1 N · m = 1 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
	m	Masse	1 kg
	n	Drehzahl	$\frac{1}{\text{s}}$ oder $\frac{1}{\text{min}}$
	Q	Wärmemenge	1 J

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
	T	Perioden- (Schwingungs-) Dauer	1 s
	t	Zeit	1 s
	t	Celsiustemperatur	1 °C
	v	Geschwindigkeit	1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
	W	Energie, Arbeit	1 W·s = 1 J = 1 N·m
Elektrotechnische Größen Elektrisches Strömungsfeld	E	elektrische Urspannung	1 V
	E	elektrische Feldstärke	1 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$
	G	elektrischer Leitwert	1 $\frac{\text{A}}{\text{V}} = 1 \text{ S}$
	I	elektrische Stromstärke	1 A
	P	Leistung	1 V·A = 1 W
	Q	Elektrizitätsmenge, Ladung	1 A·s = 1 C
	R	Widerstand	1 $\frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$
	S	Stromdichte	1 $\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
	U	Spannungsabfall, Klemmenspannung	1 V
	W _{el}	elektrische Arbeit, elektrische Energie	1 V·A·s = 1 W·s
Elektrostatisches Feld	C	Kapazität eines Kondensators	1 $\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 1 \text{ F}$
	D	Verschiebungs- flußdichte	1 $\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$
	E	elektrische Feldstärke	1 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$
	Ψ (Psi)	Verschiebungsfluß	1 A·s = 1 C
	Q	Ladungsmenge, Ladung	1 A·s = 1 C
	t _H	Halbwertszeit	1 s
	τ (Tau)	Zeitkonstante	1 s
	U	elektrische Spannung	1 V

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
Elektromagnetisches Feld	B	Magnetflußdichte	$1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T}$
	E_s	Selbstinduktions- urspannung	1 V
	H	magnetische Feld- stärke	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
	L	Selbstinduktivität, Induktivität	$1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ H}$
	Λ (Lamb- da)	magnetischer Leitwert	$1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ H}$
	M	Gegeninduktivität	$1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ H}$
	N	Windungszahl von Spulen	-
	Φ (Phi)	Magnetfluß	$1 \text{ V} \cdot \text{s} = 1 \text{ Wb}$
	R_m	magnetischer Widerstand	$1 \frac{\text{A}}{\text{V} \cdot \text{s}}$
	Θ (Theta)	magnetische Durchflutung	1 A
	V	magnetische Spannung	1 A
Wechselstrom- erscheinungen	d	Dämpfungsgrad	-
	f	Frequenz	$1 \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ Hz}$
	G	Wirkleitwert	$1 \frac{\text{A}}{\text{V}} = 1 \text{ S}$
	ω (Ome- ga)	Kreisfrequenz	$1 \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ Hz}$
	P	Wirkleistung	$1 \text{ V} \cdot \text{A} = 1 \text{ W}$
	p	Polpaarzahl	-
	φ (Phi)	Phasenverschie- bungswinkel	rad
	Q	Blindleistung	$1 \text{ var} = 1 \text{ W}$
	R	Wirkwiderstand	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$
	q (Rho)	Kreisgüte eines Resonanzkreises	-
	S	Scheinleistung	$1 \text{ V} \cdot \text{A} = 1 \text{ W}$
	T	Periodendauer	1 s
	X	Blindwiderstand, allgemein	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$
	X_C	kapazitiver Blindwiderstand	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$
	X_L	induktiver Blindwiderstand	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$
	Y	Scheinleitwert	$1 \frac{\text{A}}{\text{V}} = 1 \text{ S}$
	Z	Scheinwiderstand	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$

7.2. Wichtige Konstanten in der Elektrotechnik

Formelzeichen	Benennung	Zahlenwert	Einheit
e	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19}$	C
m_e	Elektronenmasse	$9,109 \cdot 10^{-31}$	kg
ε_0 (Epsilon)	elektrische Feldkonstante (absolute Dielektrizitätskonstante)	$8,854 \cdot 10^{-12}$	$\frac{F}{m}$
μ_0 (My)	magnetische Feldkonstante (absolute Permeabilitätskonstante)	$1,256 \cdot 10^{-6}$	$\frac{H}{m}$
π (Pi)	Verhältnis von Kreisumfang zum Kreisdurchmesser	3,14	-
ϱ (Rho)	spezifischer elektrischer Widerstand	materialabhängig (s. Tafel)	$\Omega \cdot m$
κ (Kappa)	elektrische Leitfähigkeit	materialabhängig (s. Tafel)	$\frac{S}{m}$
ε_r	relative Dielektrizitätskonstante	materialabhängig (s. Tafel)	-
μ_r	relative Permeabilität	materialabhängig (s. Tafel)	-
α (Alpha)	Temperaturkoeffizient	materialabhängig (s. Tafel)	$\frac{1}{K}$

7.3. Wichtige Formeln

Elektrische Stromstärke	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
Elektrische Stromdichte	$S = \frac{\Delta I}{\Delta A}$
Elektrische (Ur-)Spannung	$(E) U = \frac{W}{Q}$
Elektrischer Widerstand	$R = \frac{U}{I} = \text{konst. (Ohmsches Gesetz)}$
	$R = \varrho \frac{l}{A} = \frac{1}{\kappa A}$
Elektrischer Leitwert	$G = \frac{I}{U} = \text{konst.}$

	$G = \frac{A}{\varrho \cdot l} = \kappa \frac{A}{l}$
Gleichung des elektrischen Strömungsfeldes	$S = \kappa E$
Elektrischer Widerstand bei Erwärmung	$R_t = R_{20} \left[1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ\text{C}) \right]$
Elektrischer Grundstromkreis	$E = I (R_i + R_a)$
Parallelschaltung	$\sum_{k=1}^n I_{\text{zu } k} = \sum_{k=1}^n I_{\text{ab } k}$ <p>1. Kirchhoff- (Knotenpunktsatz) sches Gesetz</p>
Stromteilung in Parallelschaltungen	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$
Reihenschaltung	$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n (I R)_k$ <p>2. Kirchhoff- (Maschensatz) sches Gesetz</p>
Spannungsteilung in Reihenschaltungen	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$
Elektrische Energie (Arbeit)	$W_{\text{el}} = U I t$
Elektrische Leistung	$P = U I$
Wirkungsgrad von Energieumwandlungen	$\eta = \frac{W_{\text{ab}}}{W_{\text{auf}}}$
Kapazität eines Kondensators	$C = \frac{Q}{U}$ $C = \epsilon \frac{A}{l} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{l}$
Elektrische Feldstärke	$E = \frac{F}{Q}$ $E = \frac{\Delta U}{\Delta l}$
Dielektrische Verschiebungsdichte	$D = \frac{\Delta \Psi}{\Delta A}$
Parallelschaltung von Kondensatoren	$C_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n C_k$

Gleichung des elektrostatischen Feldes	$D = \epsilon E$
Ladungsteilung	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}$
Reihenschaltung von Kondensatoren	$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}$
Spannungsteilung	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$
Strom am Kondensator	$I_C = C \frac{\Delta U}{\Delta t}$
Induktionsgesetz	$E = - N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
	$E = - N B l_m v$
Gegeninduktionsspannung	$E_2 = - M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$
Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	$F = N B I l_m$
Induktivität einer Spule	$L = \frac{\Phi}{I} N$
	$L = \mu \frac{A}{l} N^2 = \mu_o \mu_r \frac{A}{l} N^2$
Magnetische Durchflutung	$\Theta = I N$
Magnetische Feldstärke	$H = \frac{\Theta}{l}$
Magnetische Flußdichte	$B = \frac{\Phi}{A}$
Gleichung des elektromagnetischen Feldes	$B = \mu H$
Reihenschaltung von Spulen	$L_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n L_k$
Parallelschaltung von Spulen	$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k}$
Spannungen über einer Spule	$E_s = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$
	$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Sinusförmige Wechselspannung	$u = \hat{U} \sin (\omega t + \varphi)$
Schwingungsdauer	$T = \frac{1}{f}$
Kapazitiver Blindwiderstand	$X_C = \frac{1}{\omega C}$
Induktiver Blindwiderstand	$X_L = \omega L$
Scheinwiderstand	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Scheinleitwert	$Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$
Strom im Wechselstromkreis	$I = \frac{U}{Z}$ (erweitertes Ohmsches Gesetz)
Wirkleistung	$P = U I \cos \varphi$
Blindleistung	$Q = U I \sin \varphi$
Scheinleistung	$S = U I$
Leistungsfaktor	$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkgröße}}{\text{Scheingröße}}$
Resonanzfrequenz	$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}}$

Sachwörterverzeichnis

- Abschirmung
 - elektrische 68f.
 - magnetische 93
- Addition
 - arithmetische 152, 172
 - geometrische 152, 172
- Akkumulator
 - Blei- 59
 - Kapazität 60
- Ampere 16, 136
- Anpassung 38
- Arbeit 51
- Aufmagnetisierung 108
- Augenblickswert 140, 143
- Ausschaltvorgang 85, 87
- Ausschaltzeitpunkt 85 ff.
- Außenleiter 178
 - spannung 179f.
 - strom 178
- Bedingungsgröße 27, 75 f., 98, 119
- Belastung 35 ff., 38, 64 f., 179
- Bemessungsgleichung 76, 100, 119
- Betriebsmittel 145
- Bimetallschalter 54f.
- Blindarbeit 161
- Blindfaktor 160
- Blindleistung 151, 160f.
 - induktive 151
 - kapazitive 151
- Blindleitwert
 - induktiver 149
 - kapazitiver 149
- Blindspannung
 - induktive 153
 - kapazitive 153
- Blindstrom
 - induktiver 156
 - kapazitiver 156
- Blindwiderstand 148 ff., 159
 - induktiver 150, 159
 - kapazitiver 149 f., 159
- Coulomb 17, 69
- Dämpfung 164, 166
- Diamagnetika 104
- Dichtegröße 96
- Dielektrikum 80 f., 83
- Dielektrische Polarisierung 69
- Dielektrische Verluste 83
- Dielektrizitätskonstante 73 f., 80
- Dipolbildung 69
- Drehfeld 183
- Drehstrom 183
- Drehstromspannung 175
- Dreieckschaltung 180f.
- Dreieckspannung 180
- Dreieckstrom 180
- Dreiphasensystem 176
- Dreiphasenwechselspannung 175 f.
- Dreiphasenwechselspannungs-
generator 176
- Durchflutung 103 f.
- Durchschlag 71 f.
- Effektivwert 141f.
- Einphasengenerator 174
- Einschaltvorgang 84
- Einschaltzeitpunkt 84, 86
- Elektrifizierbarkeit 74
- Elektrizitätsmenge 11, 17
- Elektrolyse 57
- Elektrolytische Dissoziation 57
- Elektromagnet 132
- Elektromagnetischer Kreis 103
- Elektronen 11 f., 18
 - schale 12
- Elektronenstrahlerwärmung 55
- Elektrotechnik 8
- Energie 9, 181
 - arten 10
 - betrachtung 88, 128
 - erhaltungssatz 9
 - formen 10
 - kinetische 9, 51, 88
 - potentielle 9, 50, 89
 - speicherung 76, 119, 128
 - thermische 52
 - umsatz 107, 129
 - umwandlung 9, 52, 54, 57, 60 f., 63, 88, 97, 110
 - wirtschaft 7
- Entmagnetisierung 108
- Erwärmung
 - elektrolytische 56
 - Elektronenstrahl- 55
 - Lichtbogen- 55
- Farad 76
- Faradayscher Käfig 69
- Faradaysches Gesetz 57 f.
- Feld 10
 - arten 67, 92
 - elektrisches 14 ff.
 - elektromagnetisches 91 ff., 98
 - elektrostatisches 66 ff., 75, 89, 92
 - größen 10
 - konstante 101
 - linien 14, 66 f., 72, 91 f., 98
 - magnetisches 182
 - stärke 23 f., 71 f., 81, 98
 - Koerzitiv- 107
 - skalares 10
 - Strömungs- 16, 27
 - Vektor- 10
- Ferromagnetika 93, 104 f., 108
- Fotoelement 61 f.
- Fotowiderstand 62
- Fotozelle 61
- Frequenz 139
- Frequenzverhalten von Widerständen 149 f.
- Funkenschaltung 129
- Funklöschung
 - an Schaltkontakten 129 f.
- Galvanisches Element 58
- Gegeninduktion 114, 116
- Gegeninduktivität 116 f.
- Gemischtschaltung 39
- Generator 112 f.
- Gesetz 48
 - Durchflutungs- 104
 - Induktions- 110
 - Lenzsches 110
- Glühlampe 60
- Grammäquivalent 57
- Größe 48
 - physikalische 15
- Grundbauelemente 124, 131
- Grundstromkreis 33, 41
- Halbleiter 13
- Halbwertszeit 90, 132
- Hauptleiter 178
- Homogenisierung 96
- Hystereseschleife 107
- Impedanz 155
- Induktanz 148
- Induktion 109 ff., 117
- Induktivität 119 ff.
- Influenz 68, 73, 92
- Ionen 11, 13, 56
- Isolationsverluste 82
- Isolierstoffe 71
- Joule 51
- Joulesches Gesetz 52
- Kapazität 149
- Kapazität 60, 76, 78 f.
- Keramische Massen 74
- Klemmenspannung 35
- Knotenpunkt 39 f.
 - satz 40, 78, 102
- Kompensationskapazität 171
- Kompensationsleistung 170 f.
- Kondensanz 149
- Kondensator 75, 78 ff., 145, 147, 158
- Koppleffluß 114
- Kopplungsgrad 115
- Korrosion 60
- Kraftwirkung 72, 133, 135 f.
- Kraftwirkungsgesetz 11, 92
- Kreisfrequenz 140
- Kreisgüte 163, 166
- Kriechstromfestigkeit 73
- Kryotechnik 13
- Kurzschluß 36
- Ladung 11 f., 17, 105
- Ladungsträger 21
- Ladungsverschiebung 68
- Leerlauf 37 f.
- Leistung 62, 151, 181
- Leistungsanpassung 65
- Leistungsbeobachtung 150
- Leistungsfaktor 160, 171
- Leistungspendelung 151
- Leistungsumsatz 64
- Leiter
 - elektrischer 12
 - Halb- 13
 - Heiß- 32
 - Ionen- 13
 - Kalt- 32
 - bewegung 112 f.
 - schleife 111, 114, 135
 - spannung 180
 - strom 178, 180
 - Nicht- 13, 66
 - stromdurchflossener 94, 134, 136
 - Supra- 12
- Leitfähigkeit 26, 33
- Leitvermögen 27
- Leitwert 27, 45, 98 ff., 116, 148
- Lichtbogenercheinungen 56
- Liniendiagramm 142 f.
- Linke-Hand-Regel 134
- Lumineszenzstrahler 61
- Magnet
 - feld 94 ff.

- fluß 96
- dichte 96f.
- pol 92
- Permanent- 108
- Magnetische Durchflutung 97
- Magnetischer Kreis 99, 101f.
- Magnetisierbarkeit 101
- Magnetisierung 105
- Magnetisierungskennlinie 104ff.
- Masche 39, 41, 102
- Maschensatz 40f., 102
- Materialeinfluß 26, 100
- Maximalwert 140
- Mehrphasengenerator 174
- Meßbereichserweiterung 46
- Mittelleiter 178
- Mittelleiterstrom 174, 177
- Mittelwert 141f.
- Motor 135
- Netzwerk 39
- Nichtleiter 13
- Nutzfeld 95f.
- Ohm 28
- Ohmsches Gesetz 30
- erweitertes 155
- Parallelschaltung 39, 44f., 50
- Parallelschwingkreis 164ff.
- Paramagnetika 104
- Pegel 25
- Logik- 25
- Periodendauer 139
- Permeabilität 97, 100f.
- Phasenkompensation 169
- Phasenverschiebung 153f., 157
- Phasenverschiebungswinkel 153
- Phasenwinkel 141
- Potential 24
- betrachtung 24f.
- differenz 24, 99
- Potentiometer 43
- Primärstrahler 61
- Proton 11
- Quellenfeld 66
- Rechte-Faust-Regel 94
- Rechte-Hand-Regel 112f.
- Reihenschaltung 39, 42, 120f., 152
- Reihenschwingkreis 161ff.
- Remanenz 105f.
- Resonanzbedingungen 161, 164
- Resonanzfall 161
- Resonanzfrequenz 162
- Sättigung 105f.
- Saugkreis 162
- Schaltung
- Ersatz- 33f.
- Gemischt- 39, 47
- Grundmeß- 18, 23, 51, 63
- Parallel- 39, 50, 121
- Reihen- 39, 42, 120f., 152
- Scheinarbeit 161
- Scheinleistung 160f.
- Scheinleitwert 155
- Scheinwiderstand 155
- Schmelzsicherung 53f.
- Schwebung 173
- Schwingkreis
- Reihen- 161ff.
- Parallel- 164ff.
- Seebeck-Effekt 56
- Sekundärelement 59
- Sekundärstrahler 61
- Selbstinduktion 116f.
- Selbstinduktivität 116
- Skineffekt 158
- Spannung 21, 70, 99, 110, 139f., 153
- Spannungsabfall 23, 71, 99
- Spannungsbereiche 26
- Spannungsmesser 44
- Spannungsmessung 23
- Spannungsquelle 35ff., 145
- Spannungsreihe 58
- Spannungsteiler 43, 48
- Spannungsteilung 42
- Spannungsüberhöhung 173
- Spannungsverlauf
- am Kondensator 147
- an der Spule 147
- am Widerstand 146
- Sperrkreis 165
- Spitzenwert 139
- Spulen 95, 111, 122, 125ff., 145f., 158
- güte 159
- ideale 124f.
- im Magnetfeld 112
- kopplung 115
- windung 96
- verlustbehaftete 123
- verlustlose 123
- zusammenschaltung 120
- Sternschaltung 177ff.
- Sternspannung 178
- Stofftransport 57
- Streufluß 96f.
- Streufluß 114
- Strom 35
- elektrischer 15
- Eracheinungen 17
- Isolations- 82
- Leitungs- 74f.
- dichte 18f.
- kreis 38f., 103
- leiter 136
- linien 15
- richtung 17, 112
- röhre 15f.
- stärke 16, 21, 136
- teilergesetz 45f.
- teilung 44
- verteilung 50
- wärme 52
- Strömungsfeld 14f.
- Stromverlauf
- am Kondensator 147
- an der Spule 147
- am Widerstand 146
- Supraleiter 12
- Temperaturkoeffizient 29, 33
- Thomsonsche Schwingungsgleichung 162, 164
- Transformatorprinzip 114
- Überlagerung 173
- Überschlag 72f.
- Ummagnetisierungsverluste 108
- Umrechnungsbeziehungen 65
- Unfallverhütung 20
- Urspannung 22, 28, 34, 49
- Ersatz- 49
- Gegeninduktions- 115
- Höhe der 111
- Induktions- 112
- Sekundär- 115
- Verkettungsfaktor 180
- Verschleibungsfluß 69f., 75
- dichte 70
- linien 69
- Verschiebungsgesetz 70
- Verschleibungsstrom
- dielektrischer 75
- Volt 22
- Wärme
- arbeit 141
- entwicklung 56
- geräte 52
- Wechselgrößen 137
- Wechselspannung 138
- Wechselspannungsquelle 172ff.
- Wechselstrom 153, 156
- Wechselstrombauelement 158
- Wechselstromkreis 145
- Wechselstromparallelschaltung 158
- Wechselstromreihenschaltung 155
- Wechselstromtechnik
- Grundgesetz 140
- Werkstoff
- ferromagnetischer 92
- Wicklung
- bifilare 117
- Chaparon- 117
- Widerstand 28ff., 145f., 148, 158
- Bemessung 28
- Bemessungsgleichung 28
- Blind- 148
- differentieller 31
- Einteilung 36
- elektrischer 27f.
- Ersatz- 42f., 45
- Gleichstrom- 31
- Kennlinie 30
- linearer 31
- magnetischer 100
- nichtlinearer 31
- Parallel- 46
- spannungsabhängiger 32
- spezifischer 26, 33
- temperaturabhängiger 32
- Verlust- 82, 123
- Widerstandsschweißen 52
- Widerstandsschweißverfahren 53
- Winkelgeschwindigkeit 140
- Wirbelstrom 117f.
- Wirkung des elektrischen Stromes
- auf den Menschen 19, 25
- chemische 19
- Licht- 19
- magnetische 19
- nützliche 20
- schädigende 20
- Wärme- 19
- Wirkungsgrad 63f.
- Wirkarbeit 161
- Wirkleistung 160f.
- Wirkspannung 153
- Wirkstrom 156
- Wirkwiderstand 150, 159
- Zählpfeil 17
- Zeigerdiagramm 143
- Zeitkonstante 90, 132
- Zusammenschaltung 76
- Zweig 39
- Zweiphasenwechselspannung 174
- Zweiphasenwechselspannungsgenerator 174
- Zweitpol
- aktiver 34, 41, 64f.
- passiver 34, 145, 158

