

KatS-LA 301/E 1

Teil 1

Grundlagen der Elektrotechnik

Ausgabe 1986

Der Leitfaden für die Ausbildung im Katastrophenschutz – KatS-LA 301/E1 – wird hiermit genehmigt.

Der Nachdruck ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung gestattet.

Bundesamt für Zivilschutz

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Definitionen und Zusammenhänge	5
1.1	Allgemeines	5
1.2	Elektrizität	5
1.3	Spannung, Strom, Widerstand	6
1.4	Das Ohmsche Gesetz	9
2	Stromarten	11
2.1	Gleichstrom	11
2.2	Wechselstrom	12
2.3	Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom)	12
3	Der Stromkreis	15
3.1	Geschlossener Stromkreis	15
3.1.1	Gleichstromkreis	15
3.1.2	Kirchhoffsche Regeln	15
3.1.3	Wechselstromkreis	17
3.2	Elektrische Leistung	22
3.3	Elektrische Arbeit	23
3.4	Leistung und Arbeit im Wechselstromkreis	23
3.5	Leistung und Arbeit im Drehstromkreis	25
4	Wirkungen des elektrischen Stromes	29
4.1	Wärmewirkung	29
4.2	Magnetisch-mechanische Wirkung	29
4.3	Lichtwirkung	31
4.4	Chemische Wirkung	32
5	Verbraucher und Wandler	35
5.1	Elektrowärmegeräte	35
5.2	Beleuchtung	35
5.3	Elektromagnete	37
5.4	Elektromotoren	38
5.5	Transformatoren	43
5.6	Gleichrichter	45
5.7	Wechselrichter	47

Anhang

- Anlage 1:** Vorsatzzeichen für Einheiten
- Anlage 2:** Griechisches Alphabet
- Anlage 3:** Kennzeichnung der Betriebsmittel
- Anlage 4:** Zusammenstellung von wichtigen Schaltzeichen

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite	
Abb. 1	Bohr'sches Atommodell	5
Abb. 2	Elektronenbewegung im Leiter	6
Abb. 3	Messen der elektrischen Spannung	6
Abb. 4	Fortbewegung freier Elektronen	7
Abb. 5	Messen der Stromstärke	7
Abb. 6	Stromrichtung und Richtung der Elektronenbewegung	11
Abb. 7	Zeitlicher Verlauf des Stromes im Gleichstromkreis	11
Abb. 8	Zeitlicher Verlauf des Stromes im Wechselstromkreis	12
Abb. 9	Drehstromgenerator	13
Abb. 10	Zeitliche Folge der Wechselströme bei einer Umdrehung (eines Drehstromgenerators)	13
Abb. 11	Parallelschaltung von Widerständen	15
Abb. 12	Reihenschaltung von Widerständen	16
Abb. 13	Bestimmungsgrößen der Wechselspannung	17
Abb. 14	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom in einer Spule mit rein induktivem Widerstand	18
Abb. 15	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom in einem Kondensator mit rein kapazitivem Widerstand	20
Abb. 16	Ersatzschaltbilder eines Scheinwiderstandes	21
Abb. 17	Geometrische Addition von Widerständen (Zeigerdiagramm)	22
Abb. 18	Zeigerdiagramm für den Wechselstromkreis	24
Abb. 19	Prinzip des Drehstromgenerators	25
Abb. 20	Vierleiternetz mit angeschlossenen Dreh- und Wechselstromverbrauchern	26
Abb. 21	Feldlinienverlauf um einen stromdurchflossenen Leiter	30
Abb. 22	Feldlinienverlauf um eine Spule	30
Abb. 23	Elektromagnet	30
Abb. 24	Spektrum der elektromagnetischen Wellen	31
Abb. 25	Schaltung/Starter einer Leuchtstofflampe	36
Abb. 26	Entstehung eines Drehmomentes einer Spule im Magnetfeld	38
Abb. 27	Stromwender	39
Abb. 28	Kusa-Schaltung	41
Abb. 29	Sterndreieckschaltung	42
Abb. 30	Leistungsschild eines Schleifringläufermotors	43
Abb. 31	Drehstromtransformator 250 kVA	44
Abb. 32	Typenschild	45
Abb. 33	Silicium-Leistungsdiode	46
Abb. 34	Innenschaltung eines Netz-/Ladegerätes mit Transformator, Gleichrichter, Kondensatoren, Drosselspule und den jeweiligen Spannungen	46

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Elektrochemische Spannungsreihe	32
Tab. 2	Elektromagnete	37
Tab. 3	Die wichtigsten Elektromotoren	40

1 Definition und Zusammenhänge

1.1 Allgemeines

In der Elektrotechnik haben sich 2 Hauptrichtungen gebildet, die Energietechnik und die Nachrichtentechnik (Informationstechnik). Unter die Energietechnik fallen Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie sowie ihre Umwandlung in andere Energieformen, wie Licht, Wärme und Kraft, sowie chemische Wirkungen.

Die Nachrichtentechnik nutzt die elektromagnetischen Erscheinungen in erster Linie zur Übertragung und Verarbeitung von Informationen.

Die Versorgung mit elektrischer Energie ist für die Bevölkerung und Industrie von großer Bedeutung. Bei Ausfall der Stromversorgung kann beispielsweise der Verkehr zusammenbrechen, die Produktion der Industrie behindert werden, bevorratete Lebensmittel können verderben und Nachrichtenmittel ausfallen.

Die zur Versorgung mit elektrischer Energie notwendigen Anlagen sind jedoch bei Naturkatastrophen oder Beschädigung und Zerstörungen im Verteidigungsfall gefährdet. Das Entstörungspersonal der Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) ist in Katastrophenfällen stark überlastet.

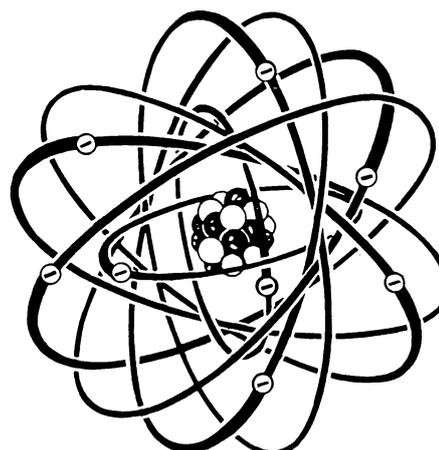
Aufgabe des Instandsetzungsdienstes im Katastrophenschutz – wahrgenommen durch Helfer des THW – ist, ein zusätzliches Potential gut ausgebildeter, geübter Helfer zur Verfügung zu stellen. Eine enge Zusammenarbeit mit dem zuständigen EVU, welches in der Regel die Koordinierung vornimmt, ist eine wichtige Grundbedingung.

1.2 Elektrizität

Zum Verständnis der Elektrizität ist es unerlässlich, den Aufbau der Materie zu kennen.

Jeden Stoff kann man in kleinste Teilchen zerlegen. Durch **mechanische** Teilbarkeit erhält man Moleküle, durch weitere **chemische** Teilbarkeit erhält man Atome. Das Atom besteht aus dem Atomkern und aus Elektronen, die um den Atomkern kreisen.

Abb. 1

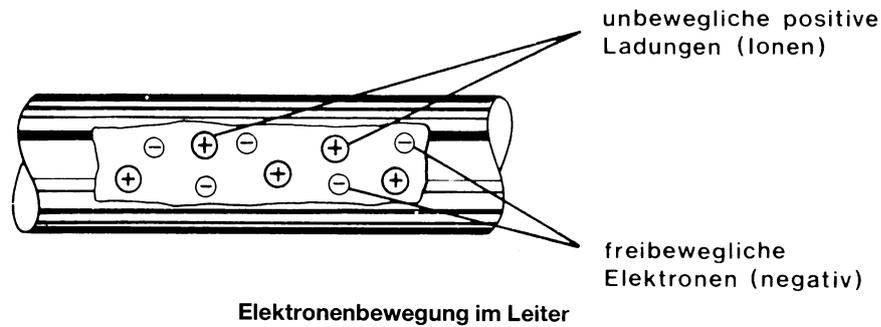


Bohr'sches Atommodell

Das Elektron ist der Träger der negativen elektrischen Ladungseinheit. Der Atomkern hat eine gleichgroße, aber entgegengesetzte, also positive Ladung und zieht dadurch das Elektron an. Es kann also von der Fliehkraft nicht fortgetragen werden.

Nicht alle Elektronen sind fest an ihren Atomkern gebunden, obwohl sie ihn umkreisen. Einzelne können sich aus ihrem Atomverband lösen. Diese Elektronen nennt man freie Elektronen (freibewegliche Elektronen). Die übrigen an den Atomkern gebundenen Elektronen bilden mit ihm zusammen den Atomrumpf (Ion).

Abb. 2



Zu dem bisher gesagten gelten folgende Gesetze:

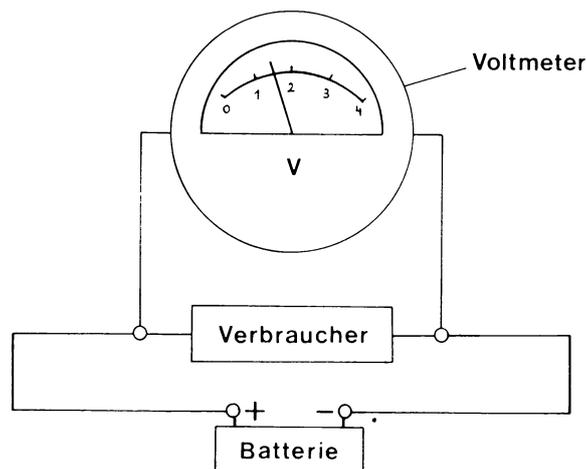
- Die Elektrizität kann nicht erzeugt werden, sie ist bereits in jedem Stoff vorhanden und zwar als negative Ladungseinheit im Elektron und als positive Ladungseinheit im Atomkern.
- Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.

1.3

Spannung, Strom, Widerstand**Spannung**

Durch mechanische, chemische oder magnetische Einwirkung werden positive und negative Ladungen voneinander getrennt.

Abb. 3

**Messen der elektrischen Spannung**

Zum Beispiel treten bei einer Batterie durch chemische Einwirkungen an der einen Klemme (-) ein Elektronenüberschuß und an der anderen Klemme (+) ein Elektronenmangel auf.

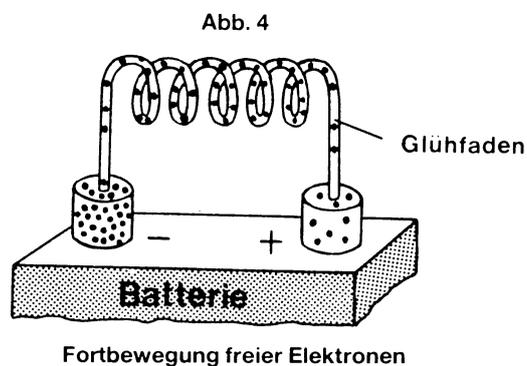
Da die Ladungen jedoch das Bestreben haben, sich wieder auszugleichen, besteht zwischen den Klemmen (Polen) eine Spannung.

Die Maßeinheit für die elektrische Spannung (U) ist das Volt (V). Die Spannung wird mit einem Spannungsmesser (Voltmeter) gemessen.

Strom

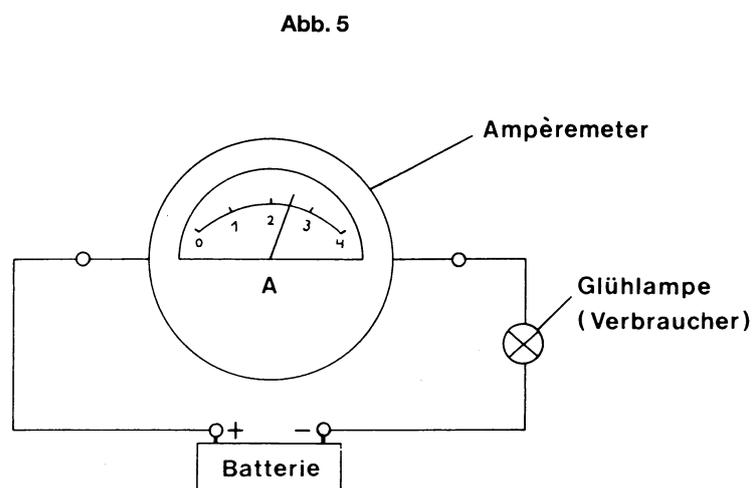
Schließt man an die Klemmen einer Batterie einen Verbraucher z. B. eine Glühlampe an, so drückt die Spannung von der negativen Klemme freie Elektronen in den Glühfaden. Diese Elektronen stoßen die benachbarten freien Elektronen im Glühfaden vor sich her, weil alle Elektronen negativ geladen sind und sich daher gegenseitig abstoßen.

Im Glühfaden pflanzt sich der Stoß fast mit Lichtgeschwindigkeit (ca. 300 000 km/s) fort.



Die Zahl freier Elektronen, die pro Zeiteinheit den Leiter (Glühfaden) durchfließt, bestimmen die Stromstärke (I).

Die Maßeinheit für die elektrische Stromstärke ist das Ampère (A). Der Strom wird mit einem Strommesser (Ampèremeter) gemessen.



Widerstand

In ihrer Fähigkeit den elektrischen Strom zu leiten, zeigen die verschiedenen Stoffe große Unterschiede. Stoffe, die den elektrischen Strom gut leiten, wie Kupfer, Aluminium oder andere Metalle, bezeichnet man als Leiter.

Stoffe, die den elektrischen Strom schlecht leiten, z. B. Luft, Gummi, Glas oder Kunststoffe, werden Nichtleiter oder auch Isolierstoffe genannt.

Jeder Leiter setzt dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegen, der durch die Spannung überwunden werden muß. Die Maßeinheit für den Widerstand (R) ist das Ohm (Ω). Der Widerstand wird mit einem Widerstandsmesser (Ohmmeter) gemessen. Jeder Werkstoff hat einen bestimmten „spezifischen Widerstand“. Dieser spezifische Widerstand ist der Widerstand eines Leiters von 1 Meter Länge, 1mm² Querschnitt bei 20° Celsius. Er wird mit dem griechischen Buchstaben ϱ (Rho) bezeichnet und angegeben in

$$\frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\varrho = \frac{R \cdot A}{l}$$

Der Kehrwert des spez. Widerstandes ist die spez. Leitfähigkeit κ (Kappa), angegeben in

$$\frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$$

$$\kappa = \frac{1}{\varrho}$$

Werkstoff	spez. Widerstand ϱ	spez. Leitfähigkeit κ
	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Kupfer (Cu)	0,01785	56
Aluminium (Al)	0,0287	35
Eisen (Fe)	0,13	7,7
Kohle (C)	10 bis 100	0,1 – 0,01
Nickelin	0,43	2,32
Konstantan	0,5	2,0

Diese Werte sind gerundet und gelten für 20° Celsius.

Für andere Abmessungen (z. B. andere Längen und andere Querschnitte) errechnet sich der Widerstand nach der Formel

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{A} \quad \text{oder} \quad R = \frac{l}{A \cdot \kappa}$$

l = Länge des Leiters in m

A = Querschnitt des Leiters in mm²

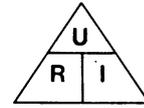
1.4

Das Ohmsche Gesetz

Schließt man einen Verbraucher an eine Spannungsquelle an, so erhält man einen Stromkreis.

In dem geschlossenen Stromkreis besteht zwischen Spannung, Strom und Widerstand die Beziehung: „Die Spannung ist gleich dem Produkt aus Strom und Widerstand“ (Ohmsches Gesetz).

$$U = R \cdot I ; \text{ bzw. } I = \frac{U}{R} ; \text{ bzw. } R = \frac{U}{I} ;$$



2 Stromarten

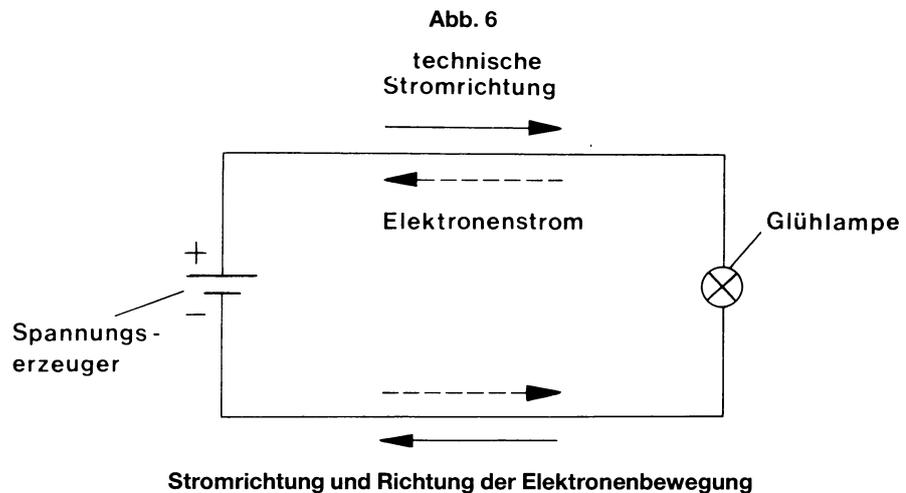
In der Elektrotechnik gibt es zwei verschiedene Stromarten: Gleichstrom (Gleichspannung) und Wechselstrom (Wechselspannung).

Darüber hinaus gibt es den Drehstrom in Form von verkettetem Wechselstrom.

Bei Überlagerung von Gleichstrom und Wechselstrom spricht man von Mischstrom.

Der physikalische Fluß des Elektronenstromes ist von der negativen zur positiven Klemme gerichtet.

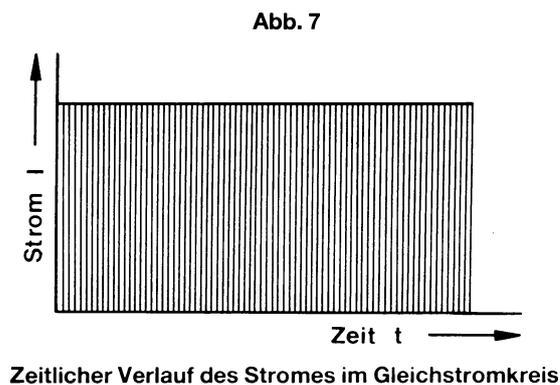
Bevor man Kenntnis von der Bewegung der freien Elektronen hatte, war dagegen international willkürlich festgelegt worden, daß der Strom von der positiven zur negativen Klemme fließt. Diese Fließrichtung wird als technische Stromrichtung bezeichnet.



2.1

Gleichstrom

Gleichstrom (Zeichen $\text{—} \Rightarrow$) nennt man den Strom, der zu jeder Zeit in gleicher Richtung mit gleicher Stärke fließt. Zeichnet man die Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit auf, so ergibt sich eine Gerade parallel zur Zeitachse (Abb. 7).



Gleichstrom kann erzeugt werden:

- in galvanischen Elementen (Taschenlampenbatterien)
- in Solarzellen
- und
- auf elektromagnetischem Wege (Generator).

Im Stahl- oder Bleisammler (z. B. Autobatterie) wird elektrische Energie beim Aufladen gespeichert und beim Entladen wieder abgegeben. Dies ist aus physikalischen Gründen nur mit Gleichstrom möglich.

In der modernen Starkstromtechnik wird Gleichstrom durch Umformen des vorhandenen Wechsel- oder Drehstroms gewonnen. Damit lassen sich Gleichstromanlagen errichten, die beachtliche Größen erreichen, z. B. Stromversorgungsanlagen für die Straßenbahnen sowie Hochspannungs-Gleichstromübertragungsanlagen (HGO).

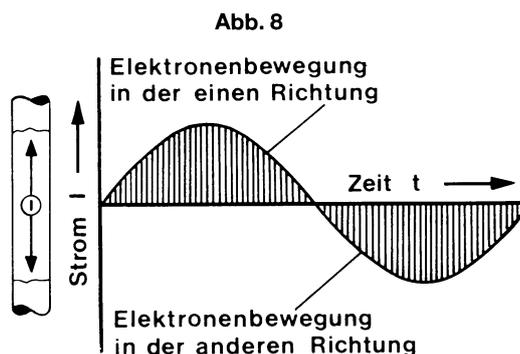
Gleichspannung und Gleichstrom haben in der Regel gleichbleibende Werte, sie können aber auch veränderlich sein.

Erfolgt diese Änderung in festen Zeitperioden, so spricht man von pulsierender Gleichspannung und pulsierendem Gleichstrom.

2.2

Wechselstrom

Wechselstrom (Zeichen \sim) nennt man den Strom, der in einem bestimmten Takt (periodisch) seine Richtung und Stärke ändert. Zeichnet man die Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit, so ergibt sich ein sinusförmiger Verlauf.



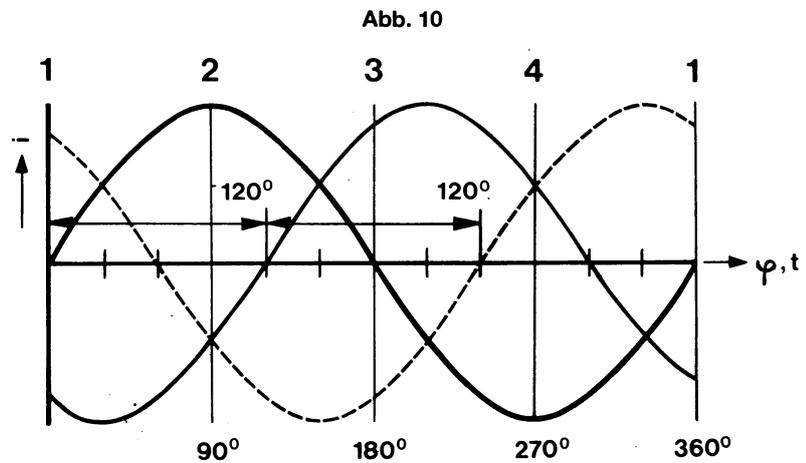
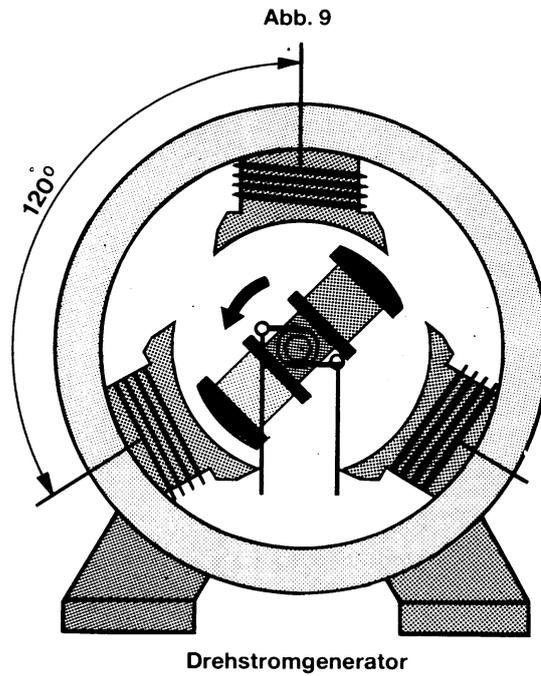
Zeitlicher Verlauf des Stromes im Wechselstromkreis

Wechselstrom wird durch Generatoren erzeugt (z. B. Fahrraddynamo).

2.3

Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom)

Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom (Zeichen $3 \sim$)) besteht aus 3 Wechselströmen, die in einem Stromerzeuger in drei um 120° versetzten Wicklungen erzeugt werden. Die Wicklungsenden werden einseitig zusammengeschlossen und dadurch wird ein verketteter Wechselstrom erzeugt, dessen Sinuskurven um 120° gegeneinander verschoben sind.



Zeitl. Folge der Wechselströme bei einer Umdrehung (eines Drehstromgenerators)

Drehstrom wird bei der Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie bevorzugt verwendet, weil er gegenüber Wechselstrom – zur Unterscheidung von Drehstrom auch Einphasenstrom genannt – wirtschaftlicher ist.

3 Der Stromkreis

3.1 Geschlossener Stromkreis

Um elektrische Energie zu nutzen, ist es erforderlich, einen geschlossenen Stromkreis zu bilden. Dieser Stromkreis besteht im einfachsten Falle aus

- dem Spannungserzeuger (Batterie, Generator)
- der Hin- und Rückleitung
- dem Verbraucher

Merke! Elektrischer Strom fließt **nur** im geschlossenen Stromkreis.

3.1.1 Gleichstromkreis

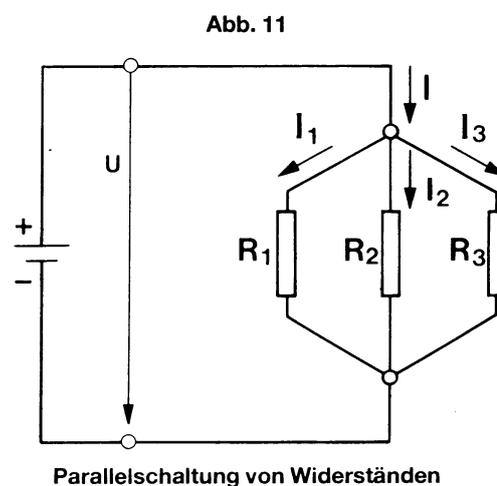
Im Gleichstromkreis bilden die Hin- und Rückleitungen und der Verbraucher einen Widerstand im Stromkreis, an dem Spannung abgebaut wird.

Nur Wirkwiderstände (Ohmsche Widerstände) bewirken bei Gleichstrom entsprechend ihrer Materialkonstante (spezifischer Widerstand) einen Spannungsfall.

3.1.2 Kirchhoffsche Regeln

Ein Stromkreis kann mehrere Widerstände beinhalten, die entweder parallel oder in Reihe geschaltet sind. Weiterhin können in einem Stromkreis auch gemischte Schaltungen (parallel und in Reihe geschaltet) auftreten.

Kennzeichen einer **Parallelschaltung** ist, daß die Widerstände an derselben Spannung liegen.



Die 1. Kirchhoffsche Regel lautet:

In einem Verzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ($I = \frac{U}{R}$) bedeutet dies:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

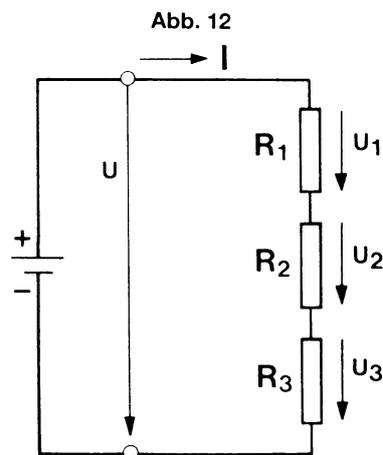
daraus folgt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Merke:

In einer Parallelschaltung von Widerständen ist der Kehrwert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Kehrwerte der Teilwiderstände.

Kennzeichen einer **Reihenschaltung** ist, daß alle Widerstände von demselben Strom durchflossen werden.



Reihenschaltung von Widerständen

Nach der 2. Kirchhoffschen Regel ist

die Summe der Teilspannungen gleich der Summe der angelegten Spannungen.

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Nach dem Ohm'schen Gesetz ($U = R \cdot I$) ist

$$I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3$$

daraus folgt

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Merke:

In einer Reihenschaltung von Widerständen ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Teilwiderstände.

3.1.3 Wechselstromkreis

Der allgemeine Wechselstromkreis enthält ohmsche Widerstände, induktive Widerstände (Spulen) und kapazitive Widerstände (Kondensatoren). Wie die von der Wechselspannungsquelle zur Verfügung gestellte elektrische Energie im Wechselstromkreis umgesetzt wird, hängt von der Art und Größe der Widerstände ab.

Eine echte Energiewandlung im Sinne einer Energieabgabe nach außen findet nur in ohmschen Widerständen statt. Dies gilt auch im Gleichstromkreis. Der ohmsche Widerstand wird im Wechselstromkreis als Wirkwiderstand bezeichnet.

Spulen und Kondensatoren geben im Idealfall keine Energie nach außen ab.

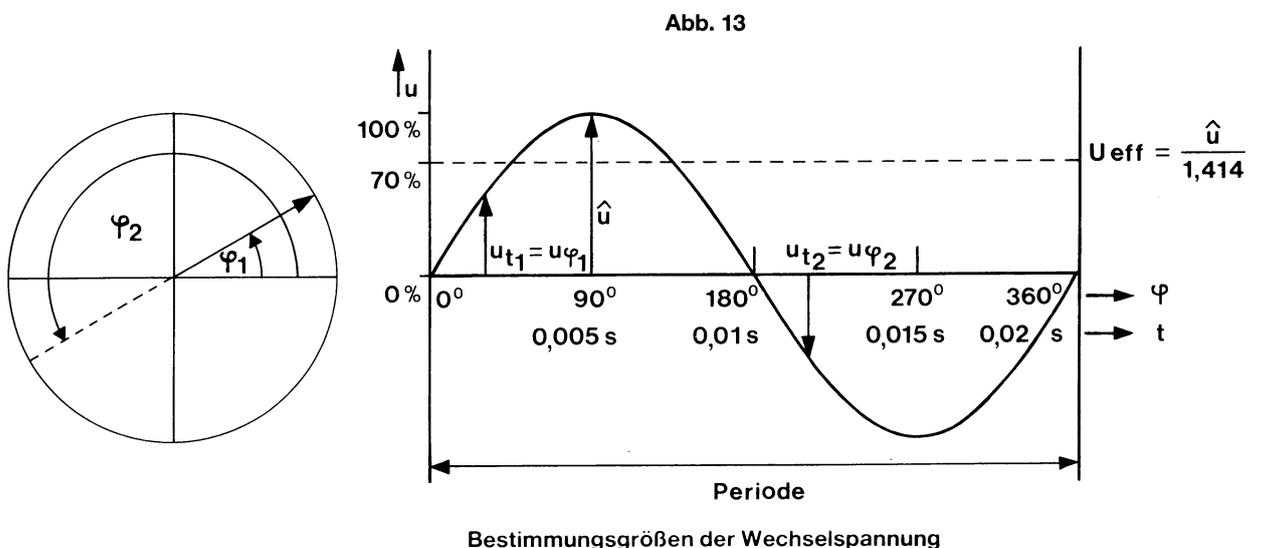
Sie haben aber Auswirkungen auf Stärke und Phasenlage des im Wechselstromkreis fließenden Stromes. Zur Unterscheidung von dem energieabgebenden Wirkwiderstand werden sie als Blindwiderstände bezeichnet.

Wie der Verlauf des Stroms im Wechselstromkreis ist auch der Verlauf der Spannung, die man sich als gleichbleibend über die Periode vorstellen kann, gerechnet.

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{1,414} = 0,707 \cdot \hat{u} \sim 70\% \cdot \hat{u}$$

\hat{u} = maximale augenblickliche Spannung.

Alle Angaben in der Energietechnik erfolgen in der Regel in Effektivwerten. Man setzt daher $U_{\text{eff}} = U$ und $I_{\text{eff}} = I$, da keine Verwechslungen vorkommen können.



Hier bedeuten:

u_{t1} = Augenblickswert der Spannung zum Zeitpunkt t_1

u_{t2} = Augenblickswert der Spannung zum Zeitpunkt t_2

Jedem Punkt auf der Zeitachse kann man einen Phasenwinkel zuordnen. Das hat den Vorteil, daß man nicht mit der ständigen Zunahme der Zeit rechnen muß,

da sich die Winkel nach Ablauf einer Periode wiederholen. Eine Periode entspricht einem vollständigen Umlauf eines Kreises (360°).

In den öffentlichen Netzen West-Europas wird der Wechselstrom mit 50 Perioden pro Sekunde eingespeist, d. h., daß die Elektronen 50 mal in der Sekunde hin- und herschwingen. Die Anzahl der Perioden pro Sekunde nennt man Frequenz.

Die Maßeinheit der Frequenz bezeichnet man mit Hertz (Hz)

$$1 \text{ Hertz (Hz)} = 1 \text{ Periode pro Sekunde } \left(\frac{1}{\text{s}}\right)$$

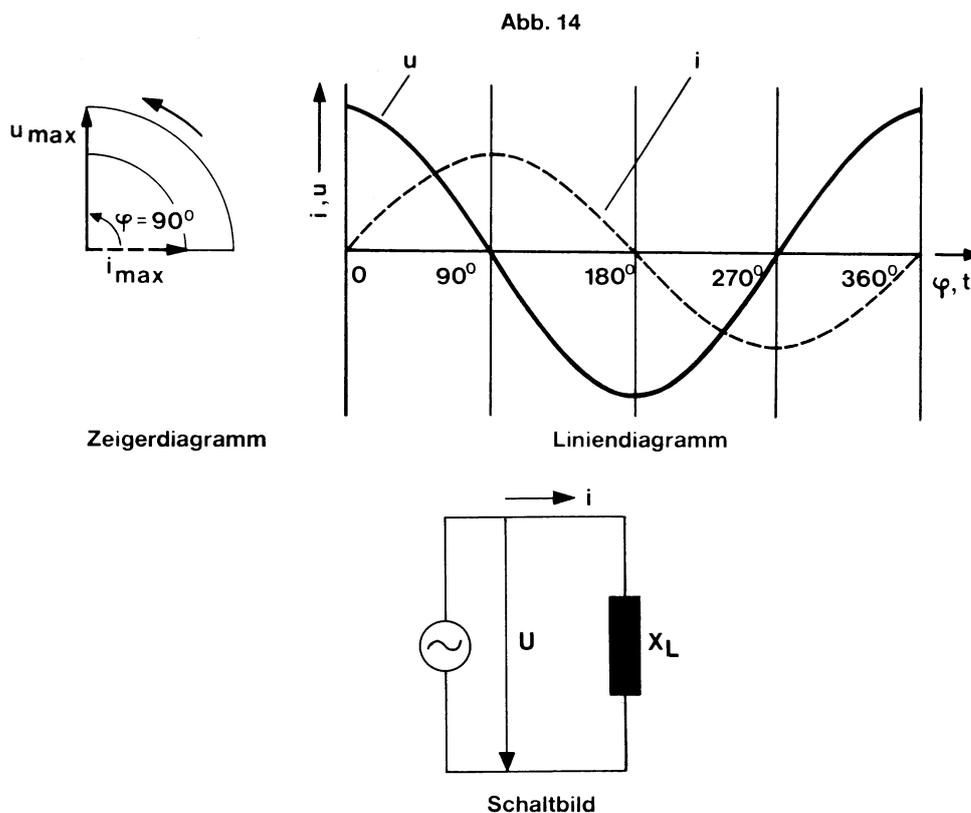
Abweichend hiervon speisen Bundesbahngeneratoren Strom von $16 \frac{2}{3}$ Hz in das bahneigene Netz ein.

Induktiver Widerstand im Wechselstromkreis:

Sind in einem Wechsel- oder Drehstromkreis Verbraucher angeschlossen, die Spulen mit Eisenkernen enthalten (z. B. Motoren, Drosselspulen in Leuchtstofflampen, Umspanner, Relais, Schütze), so ändert sich die zeitliche bzw. Winkellage der Sinuskurven von Spannung und Strom zueinander.

Der Strom eilt der Spannung nach, im idealisierten Falle um 90° Grad. Dieser Vorgang wird hervorgerufen durch den induktiven Widerstand X_L .

Die Dimension von X_L wird in Ohm (Ω) ausgedrückt. Die sich daraus ergebende Änderung der Sinuskurven ist in Abb. 14 dargestellt.



Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom in einer Spule mit rein induktivem Widerstand.

Hierbei bedeuten:

- U = Netzspannung (Effektivwert)
- u = Netzspannung (Augenblickswert)
- I = Netzstrom (Effektivwert)
- i = Netzstrom (Augenblickswert)
- X_L = induktiver Widerstand
- φ = Phasenwinkel
- t = Zeit

Die zeitlichen und räumlichen Zusammenhänge zwischen Strom- und Spannung werden im allgemeinen im Liniendiagramm dargestellt.

Im Zeigerdiagramm ist zur Anschaulichkeit die Zeitachse des Liniendiagramms auf einen Kreis übertragen.

Der induktive Widerstand X_L ist abhängig von der

- Induktivität L einer Spule
- Der Kreisfrequenz ω

Diese ist das Produkt aus der Netzfrequenz f und der Kreisconstanten 2π

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Die Induktivität L einer Spule ist ein Maß für ihre Fähigkeit eine Selbstinduktionsspannung zu erzeugen.

Die Einheit der Induktivität ist das Henry (H).

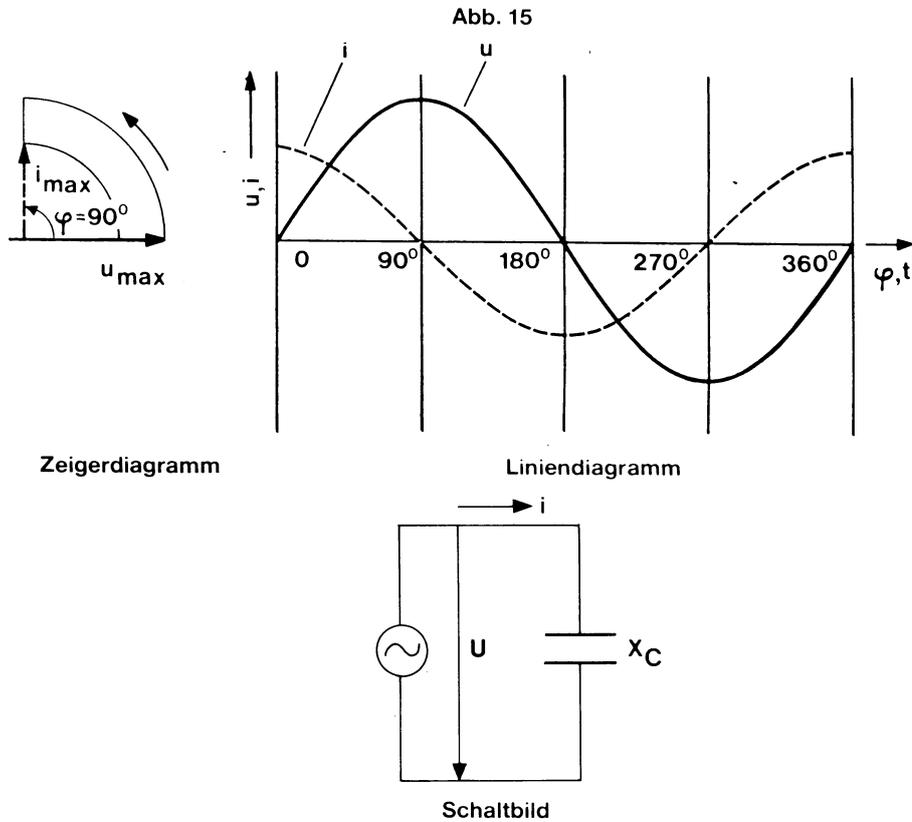
$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

Eine Spule hat die Induktivität 1 H, wenn bei einer gleichmäßigen Änderung des Spulenstromes zum 1 A je Sekunde (1 A/s) eine Selbstinduktionsspannung von 1 V induziert wird.

Kapazitiver Widerstand im Wechselstromkreis:

Zu den kapazitiven Widerständen gehören Kondensatoren, Kabel und Freileitungen. Im Prinzip dienen Kondensatoren zur Ansammlung von Elektrizitätsmengen und bestehen im wesentlichen aus 2 Metallbelägen, die voneinander isoliert sind. Die Isolation heißt Dielektrikum.

In einem Wechselstromkreis mit einem kapazitiven Widerstand eilt der Strom der Spannung im idealisierten Falle um 90° Grad vor.



Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom in einem Kondensator mit rein kapazitivem Widerstand.

Hierbei bedeuten:

- U = Netzspannung (Effektivwert)
- u = Netzspannung (Augenblickswert)
- I = Netzstrom (Effektivwert)
- i = Netzstrom (Augenblickswert)
- X_C = Kapazitiver Widerstand
- φ = Phasenwinkel
- t = Zeit

Dieser Vorgang wird hervorgerufen durch den kapazitiven Widerstand X_C . Die Dimension von X_C wird wie beim induktivem Widerstand in Ohm (Ω) ausgedrückt.

Der kapazitive Widerstand X_C ist abhängig vom Kehrwert der Kapazität C des Kondensators und dem Kehrwert der Kreisfrequenz ω .

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Die Kapazität C eines Kondensators ist ein Maß für seine Fähigkeit, eine elektrische Ladung zu speichern.

Die Einheit der Kapazität ist das Farad (F).

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}}$$

Ein Kondensator hat die Kapazität $C = 1 \text{ F}$, wenn er bei der angelegten Spannung 1 V die Ladung $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ Ampèresekunde}$ aufnimmt.

Merke:

Mit Kondensatoren läßt sich der Strom, der von Spulen zum Nacheilen gezwungen wird, wieder in eine nutzbringende Phasenlage zurückversetzen (Kompensation).

Die für den Wechselstromkreis beschriebene ohmsche, induktive oder kapazitive Belastung und die sich damit ergebende Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung gelten auch im Drehstromkreis.

Scheinwiderstand im Wechselstromkreis:

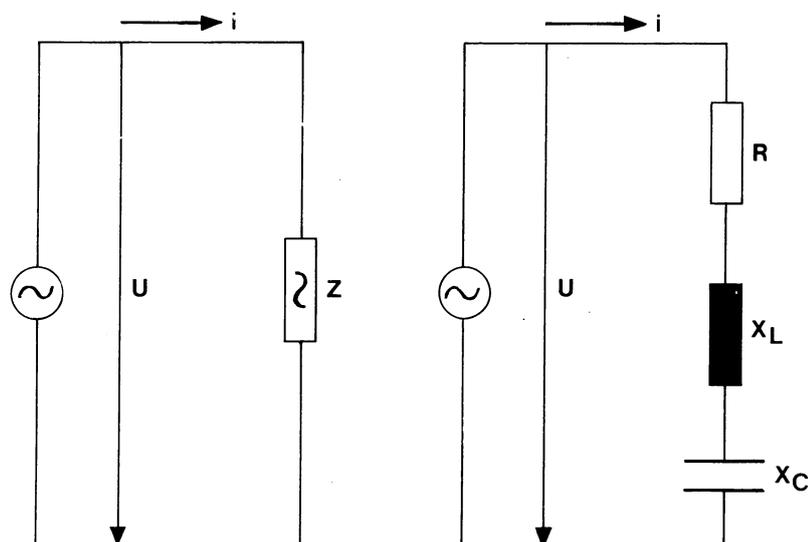
Die bisher betrachteten Widerstände sind in ihren Auswirkungen auf den Stromkreis idealisiert.

Betrachtet man als Beispiel eine wechselstromdurchflossene Spule, so hat diese einen bestimmten ohmschen Widerstand R , weil sie aus einem metallischen Leiter gewickelt ist. Als Spule besitzt sie außerdem eine Induktivität L , die erwünscht ist, weil mit ihr magnetische Wirkungen erzielt werden sollen, z. B. bei Elektromagneten. Sie stellt jedoch auch eine Kapazität C dar, weil von Windung zu Windung eine Spannungsdifferenz besteht und die beiden gegeneinander isolierten Windungen wie ein Kondensator wirken. Ein solches Bauteil, das verschiedenartige Wechselstromwiderstände umfaßt, wird als Scheinwiderstand Z bezeichnet.

Grundsätzlich ist jeder Wechselstromwiderstand ein Scheinwiderstand, weil er unvermeidbar auch die anderen Widerstandsarten mit enthält.

Nachfolgend ist das Schaltbild eines Wechselstromkreises mit Scheinwiderstand und das Ersatzschaltbild mit Reihenschaltung je eines ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerstand dargestellt.

Abb. 16



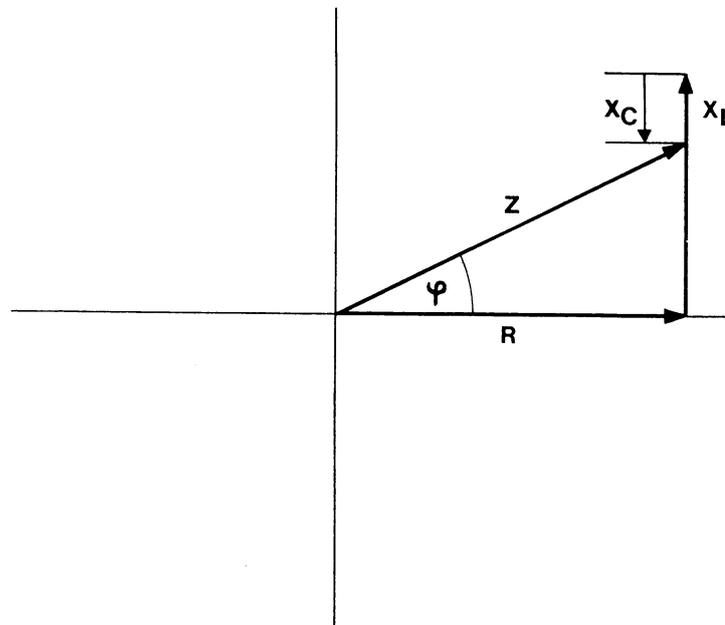
Ersatzschaltbilder eines Scheinwiderstandes

Zeichnerisch kann man Widerstände wie Strom und Spannung mit Richtungspfeilen darstellen.

Hierbei wird der Wirkwiderstand als waagerechter Pfeil nach rechts dargestellt, die Pfeile für induktive und kapazitive Blindwiderstände in senkrechter Richtung

- induktiv im Sinne des nacheilenden Stromes nach oben
- kapazitiv im Sinne des voreilenden Stromes nach unten.

Abb. 17



Geometrische Addition von Widerständen (Zeigerdiagramm)

Der Scheinwiderstand Z ist gleich:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Der Winkel φ zwischen dem Wirkwiderstand R und dem ermittelten Scheinwiderstand Z im Zeigerdiagramm (Abb. 17) entspricht der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

In ähnlicher Form können in einer allgemeinen, gemischten Schaltung mit einer beliebigen Anzahl von Wechselstrom-Widerständen in Reihen- und Parallelschaltung der Gesamtscheinwiderstand und der Phasenverschiebungswinkel rechnerisch oder zeichnerisch ermittelt werden.

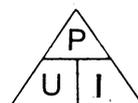
3.2

Elektrische Leistung

Die Leistung P des elektrischen Stromes wird durch das Produkt aus Spannung U (in Volt) und Stromstärke I (in Ampère) bestimmt.

Elektrische Leistung

$$P = U \cdot I$$



Die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt (W).

Ein Watt ist die Leistung eines Stromes von 1 Ampère (A) bei einer Spannung von 1 Volt (V).

$$1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ W}$$

Eine bestimmte elektrische Leistung kann bei verschiedenen Spannungen erzielt werden. Ist die Spannung klein, so muß die Stromstärke groß sein; ist die Spannung groß, so kann die Stromstärke klein sein.

Bei Anwendung des Ohmschen Gesetzes kann man die elektrische Leistung auch mit folgenden Formeln berechnen:

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Bei gleichbleibendem Widerstand eines Verbrauchers ändert sich die elektrische Leistung sowohl mit dem Quadrat der Stromstärke als auch mit dem Quadrat der Spannung.

3.3

Elektrische Arbeit

Wird die elektrische Leistung P eine bestimmte Zeit t in Anspruch genommen, so wird Arbeit verrichtet.

Die elektrische Arbeit W ist also das Produkt aus elektrischer Leistung P und Zeit t .

$$W = P \cdot t$$

W = Arbeit

P = Leistung

t = Zeit

Die Maßeinheiten der elektrischen Arbeit sind

– die Wattsekunde (Ws); $1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$ (Joule)

und

– die Kilowattstunde (kWh); $\text{kW} \cdot \text{h} = \text{kWh}$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3\,600\,000 \text{ Ws} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3\,600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$$

Die elektrische Arbeit wird vom Elektrizitätszähler in kWh gemessen.

3.4

Leistung und Arbeit im Wechselstromkreis

Die Formel $P = U \cdot I$ berücksichtigt nicht, daß eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom vorhanden sein kann.

Sie gilt auch nur für Gleichstrom und für Wechselstrom, wenn keine Blind-Widerstände (Spulen oder Kondensatoren) im Stromkreis vorhanden sind. Praktisch trifft das nur zu, wenn Glühlampen und Heizdrähte (Ohmsche Verbraucher) im geschlossenen Stromkreis vorhanden sind.

Außerdem sind in der Formel bei der Anwendung für den Wechselstromkreis die Effektivwerte für Strom und Spannung einzusetzen.

Die **Scheinleistung** eines Wechselstromkreises, in dem Wirk- und Blindwiderstände enthalten sind, errechnet sich aus dem gemessenen Gesamtstrom (I) und der Spannung (U) nach der Formel

$$P_s = U \cdot I$$

Im Gegensatz zu der sonst üblichen Leistungseinheit Watt wird die Scheinleistung in Volt-Ampère (VA) angegeben.

Die **Blindleistung** in einem Wechselstromkreis dient zum Aufbau der elektromagnetischen Felder, z. B. in Elektromotoren und Transformatoren. Sie ist zum Betrieb aller induktiven Verbraucher unerlässlich, kann aber im Gegensatz zur Wirkleistung in keine nutzbare Energieform umgesetzt werden.

$$P_q = U \cdot I_q$$

Dabei ist I_q der Blindstrom.

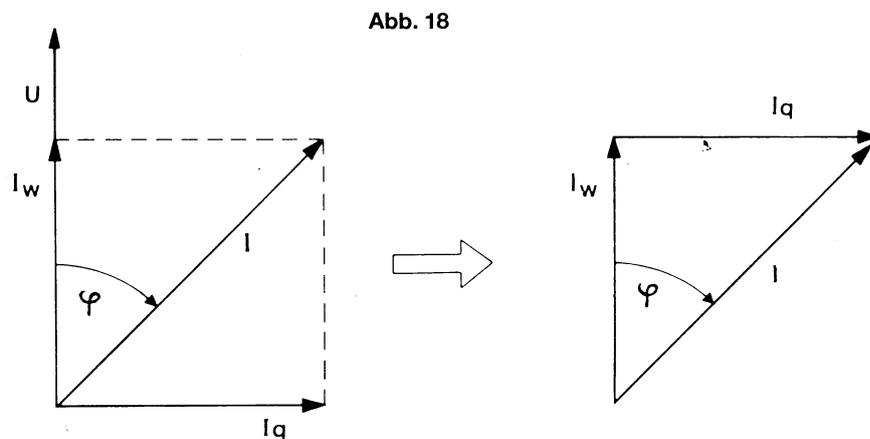
Wirkleistung

Die Wirkleistung ermittelt man aus

$$P = U \cdot I_w$$

Dabei ist I_w = der Wirkstrom.

Mit Ampèremetern wird der Effektivwert des Scheinstromes I gemessen. Im Zeigerdiagramm stellt sich dies folgendermaßen dar:



Zeigerdiagramm für den Wechselstromkreis

Um die Wirkleistung rechnerisch ermitteln zu können, ist die Größe des Phasenverschiebungswinkels zwischen Wirkstrom und Scheinstrom zu bestimmen. Die

Wirkleistung wird durch das Produkt von Spannung und Scheinstrom multipliziert mit dem Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ errechnet.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Der $\cos \varphi$ wird auch als Leistungsfaktor bezeichnet.

Merke:

Die Scheinleistung muß zur Verfügung gestellt werden, jedoch nur die Wirkleistung ist als Energie nutzbar.

Wird die Wirkleistung (P) eine bestimmte Zeit in Anspruch genommen, so wird Arbeit (W) verrichtet.

Im Wechselstromkreis wird diese nach der Formel

$$W = P \cdot t$$

berechnet.

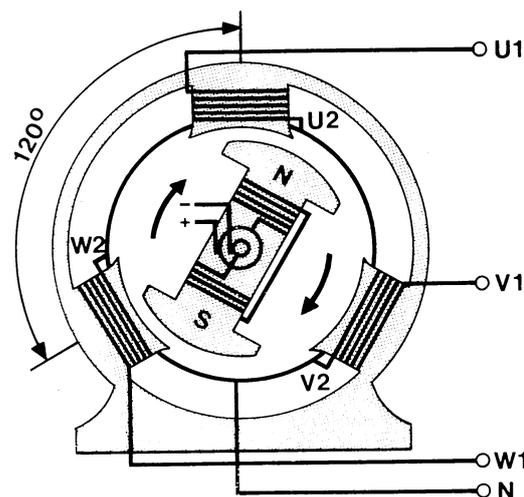
Nur die Wirkleistung kann Arbeit verrichten.

3.5 Leistung und Arbeit im Drehstromkreis

Drehstromgeneratoren enthalten 3 Induktionswicklungen, Stränge genannt. Sie sind in 2poligen Generatoren räumlich gegeneinander um den Winkel $\alpha = 120$ Grad versetzt angeordnet. Somit beträgt der Phasenverschiebungswinkel der 3 Strangspannungen ebenfalls $\varphi = 120$ Grad.

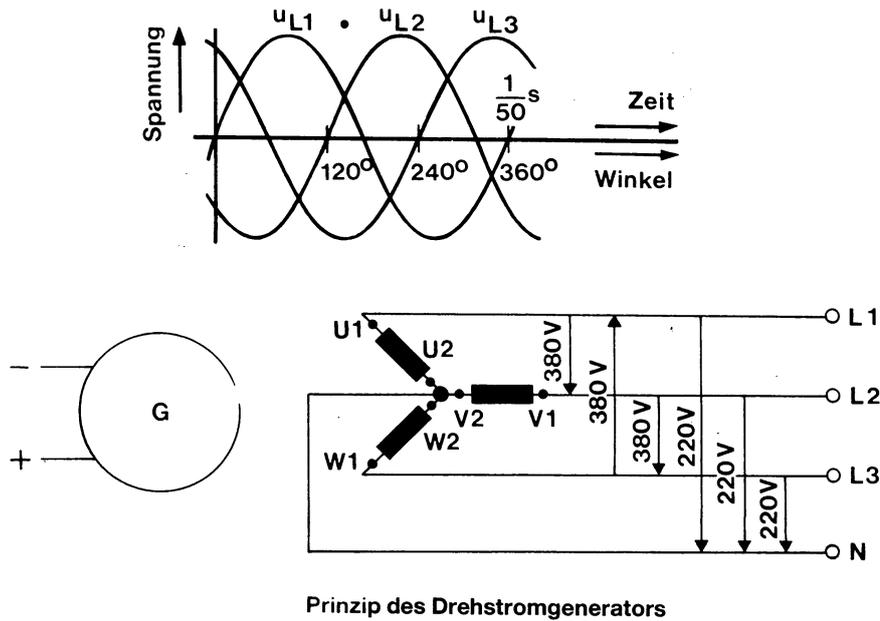
Die Summe der Augenblickswerte von 3 gleich großen um 120° phasenverschobenen Wechselspannungen und -strömen ist in jedem beliebigen Zeitpunkt gleich Null. Diese Eigenschaft ermöglicht die Verkettung der 3 Strangstromkreise zur Stern- oder Dreieckschaltung. Bei dieser Art der Schaltung kann man die zur Fortleitung elektrischer Energie erforderlichen 6 Leiter auf 3 reduzieren.

Abb. 19



Prinzip des Drehstromgenerators

noch: Abb. 19



Durch die Verkettung der 3 Wicklungen des Drehstromgenerators erhöht sich die erzeugte Spannung gegenüber einem Wechselstromgenerator mit gleicher Wicklung um den Faktor $\sqrt{3} = 1,73$.

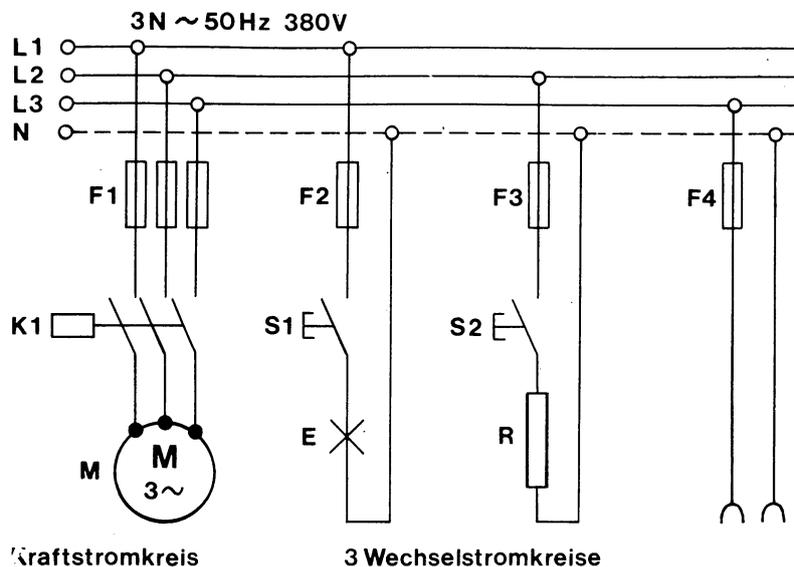
Damit wird die Klemmenspannung beim Drehstromgenerator z. B. $220 \text{ V} \cdot \sqrt{3} = 380 \text{ Volt}$.

Hieraus folgt die Leistung des Drehstromes

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Bei der Dreieckschaltung der Wicklungen im Generator liegen bezogen auf die Leistung gleiche Verhältnisse vor.

Abb. 20



Vierleiternetz mit angeschlossenen Dreh- und Wechselstromverbrauchern

Da im allgemeinen das verkettete Drehstromnetz als Vierleiternetz aufgebaut ist, können sowohl Drehstrom als auch Wechselstromkreise gleichzeitig angeschlossen und betrieben werden.

In diesem Falle ist darauf zu achten, daß die Wechselstromleistung gleichmäßig auf alle drei Außenleiter aufgeteilt wird. Die Leistungsberechnung ändert sich hierdurch nicht.

Bei ungleichmäßiger Verteilung der Leistung (Schieflast) fließt über den Neutralleiter ein Ausgleichsstrom.

4 Wirkungen des elektrischen Stromes

Elektrischer Strom ist mit menschlichen Sinnesorganen nicht wahrnehmbar, sondern nur an seinen Wirkungen zu erkennen.

Die drei wesentlichen Wirkungen sind:

- Wärmewirkung
- magnetisch-mechanische Wirkung
- Lichtwirkung
- chemische Wirkung.

4.1 Wärmewirkung

Elektrischer Strom erzeugt in jedem ohmschen Widerstand Wärme. Da jeder elektrische Leiter einen Widerstand darstellt, entwickelt sich bei Stromdurchfluß teils unerwünschte Wärme (z. B. in Leitungen, Wicklungen elektr. Motore), teils gewollte Wärme (z. B. Heizgeräte, Herde).

Um Leitungen und Geräte vor zu hoher Erwärmung durch Überstrom zu schützen, sind Schutzorgane (z. B. Schmelzsicherungen, Leitungsschutzschalter) eingebaut, die bei Überlastung und Kurzschluß den Stromkreis unterbrechen.

Die gewollte Wärmewirkung des elektrischen Stromes wird ausgenützt in Elektrohaushaltsgeräten (z. B. Heizgeräte, Herde, Heißwasserbereiter) sowie in Gewerbe/Industrie (z. B. Metallschmelzöfen, Härtegeräte, Sterilisatoren).

4.2 Magnetisch-mechanische Wirkung

Auch der Magnetismus ist nur an den von ihm hervorgerufenen Wirkungen zu erkennen. Er ist zum einen in der Lage, Kräfte auszuüben, d. h. Magnete ziehen Eisenteile an und versetzen durch ihre Kraftwirkungen Elektromotoren in Drehung.

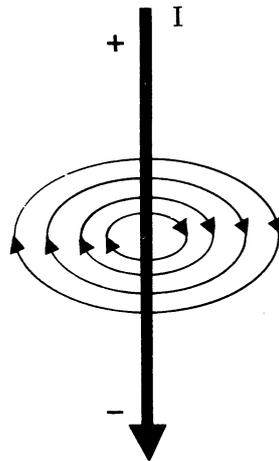
Zum anderen werden durch ihn in elektrischen Leitern Spannungen erzeugt (induziert), wovon man in Generatoren und Transformatoren Gebrauch macht.

Beide Wirkungen lassen sich mit Dauer- bzw. Elektromagneten hervorrufen.

Der Raum, auf den sich die Wirkung eines Magneten erstreckt, heißt magnetisches Feld.

Werden die magnetischen Kräfte und Eigenschaften durch den elektrischen Strom hervorgerufen, spricht man von **Elektromagnetismus**. Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem elektromagnetischen Feld umgeben, in dem die Kraftlinien kreisförmig um den Leiter verlaufen.

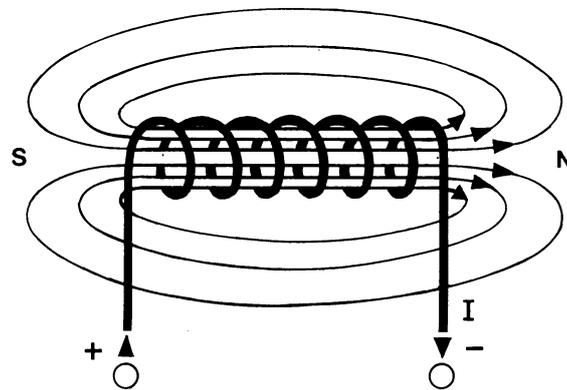
Abb. 21



Feldlinienverlauf um einen stromdurchflossenen Leiter

Die elektromagnetische Wirkung eines Leiters kann man vergrößern, wenn der Leiter zu einer Spule mit mehreren Windungen geformt wird.

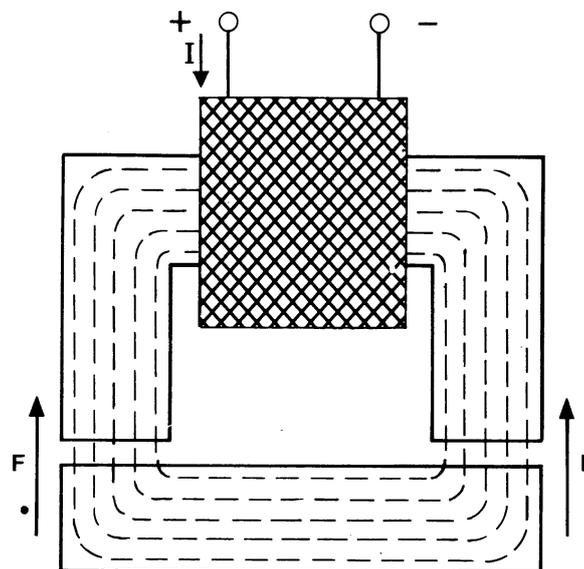
Abb. 22



Feldlinienverlauf um eine Spule

Eine noch größere Wirkung läßt sich erzielen, wenn man die Spule auf einen Eisenkern wickelt. Auf diese Weise erhalten wir einen Elektromagneten.

Abb. 23



Elektromagnet

4.3 Lichtwirkung

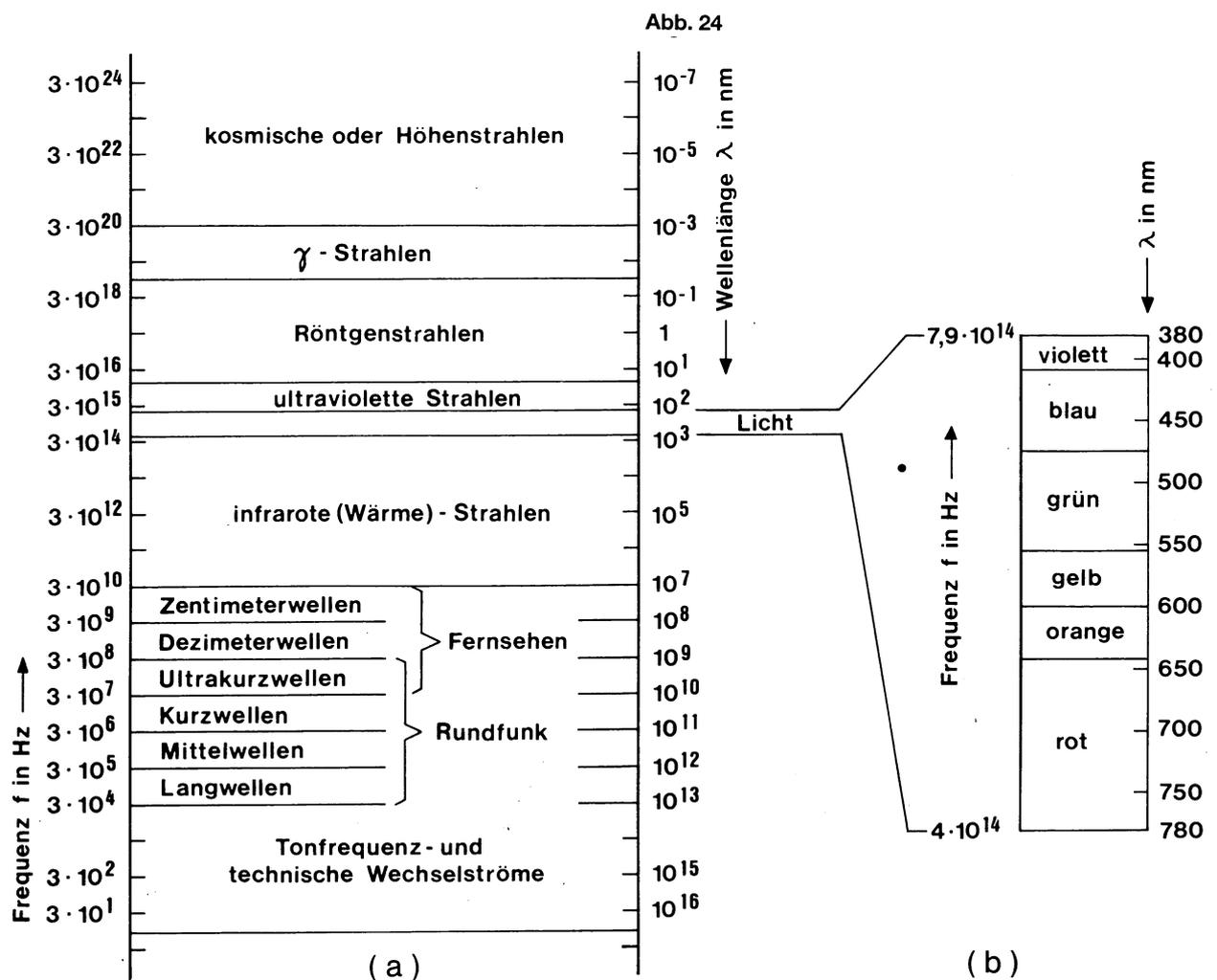
Neben der Wärmewirkung ist die Lichtwirkung die bekannteste Wirkung des elektrischen Stromes.

Elektrische Lampen wandeln hierbei elektrische Energie in Lichtenergie (durch das Auge wahrnehmbar) und Wärmeenergie um.

Licht und Wärme als elektromagnetische Schwingungsenergie haben die Fähigkeit, sich im leeren Raum auszubreiten.

Beispiel: Licht- und Wärmestrahlung der Sonne gelangen durch den Weltraum zur Erde.

Die Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungsenergie geschieht mit Lichtgeschwindigkeit (c) ca. 300.000 km/s bei einer sehr hohen Frequenz (f).



Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Die Zusammenstellung (Abb. 24) zeigt eine Gesamtdarstellung der heute bekannten elektromagnetischen Wellen (a) und gesondert herausgezogen die des sichtbaren Lichtes (b).

Die darin angegebene Wellenlänge (λ) errechnet sich aus der Formel

$$\text{Wellenlänge } (\lambda) = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit } (c)}{\text{Frequenz } (f)}$$

und wird in Nanometer (nm) angegeben (s. Tabelle – im Anhang) Tageslicht, also Sonnenlicht, besteht aus einer Mischung von Lichtwellen des gesamten sichtbaren Spektrums, es enthält somit alle Farben. Dies beweist der Regenbogen, der das in seine Grundfarben rot-gelb-grün-blau-violett und deren Übergänge zerlegte Sonnenlicht zeigt.

Künstliches Licht hat Spektren, die je nach der Lichtquelle verschieden zusammengesetzt sind. Glühlampen haben einen größeren Rotanteil als Sonnenlicht. Bei Leuchtstofflampen kann das Spektrum durch die Art des Leuchtstoffes weitgehend beeinflusst werden.

4.4 Chemische Wirkung

Chemische Wirkungen durch den elektrischen Strom bedingen das Vorhandensein von

- einer elektrolytischen Flüssigkeit (leitfähig), bestehend aus Wasser und Säuren, Laugen oder Salzen,
- zwei Elektroden genannt Kathode (–) und Anode (+) aus unterschiedlichen Stoffen,
- Gleichstrom.

Unter der Wirkung des Stromes wandern Ionen, die im Elektrolyt frei beweglich sind, je nach ihrer Ladung zu den Elektroden (positiv geladene Ionen zur Kathode (–), negativ geladenen Ionen zur Anode (+).

Bei diesem Vorgang werden die Unterschiede der Stoffe der Elektroden in der elektrochemischen Spannungsreihe ausgenutzt, um

- in der Galvanotechnik reine Metalle zu gewinnen, Metalloberflächen zu veredeln
- Elektrizität zu speichern (Akkumulatoren)
- Gleichstrom kleiner Leistung zu erzeugen (Batterie).

Tabelle 1

	Volt		Volt		Volt
Kalium	Ka – 2,92	Wasserstoff	H ± 0,00	Kupfer	Cu + +0,34
Kalzium	Ca – 2,76			Kohle	C + 0,74
Natrium	Na – 2,71			Quecksilber	Hg + 0,79
Magnesium	Mg – 2,37			Silber	Ag + 0,81
Aluminium	Al – 1,67			Gold	Au + 1,38
Mangan	Mn – 1,18			Platin	Pt + 1,60
Zink	Zn – 0,76				
Chrom	Cr – 0,51				
Eisen	Fe – 0,44				
Kadmium	Cd – 0,40				
Kobalt	Co – 0,29				
Nickel	Ni – 0,25				
Zinn	Sn – 0,16				
Blei	Pb – 0,13				

Elektrochemische Spannungsreihe

Eine nicht gewünschte chemische Wirkung ist die Oxidation eines unedleren Metalls durch ein in der Spannungsreihe höher liegendes Metall, bei deren unmittelbaren Verbindung, unter dem Einfluß von Wasser (z. B. Zerstörung des Aluminiumseiles bei Verbindung mittels Kupferklemmen).

Diesen Vorgang nennt man elektrochemische Korrosion.

5 Verbraucher und Wandler

5.1 Elektrowärmegeräte

Der Wärmebedarf in Industrie, Gewerbe und Haushalt zum Schmelzen, Schweißen, Glühen, Heizen, Trocknen, Kochen wird wegen guter Steuer-/Regelbarkeit – bevorzugt durch elektrische Energie – gedeckt.

Die erzeugte Wärme muß gezielt dorthin geleitet werden, wo sie schwerpunktmäßig gebraucht wird.

Die Übertragung der Wärme kann erfolgen durch

Wärmeleitung – über gute Wärmeleiter wie Metalle

– Wärmeströmung (Konvektion), bei der die Wärme durch andere Medien – bevorzugt Luft oder Wasser – übertragen wird

– Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung), bei der die Übertragung durch elektromagnetische Schwingungen (Wellen) auch im luftleeren Raum erfolgt

Um Wärme dosiert einsetzen zu können, ist eine Steuerung oder Regelung notwendig.

Unter Steuern versteht man die Beeinflussung der zu verändernden Größe durch Betätigung eines Steuergerätes z. B. Stufenschalter beim Elektroherd. Durch Regeln wird die zu beeinflussende Größe z. B. die Temperatur eines Wärmege-
rätes automatisch auf einen vorgegebenen Wert gehalten (Bimetallschalter in Heizgeräten/Kapillarrohrregler u. a.).

Die notwendige Isolation der elektrischen Leiter in den Wärmegeräten behindert den Wärmetransport an die gewünschten Stellen. Die Elektroisolation kann daher nur einen Kompromiß zwischen Wärme- und elektrischen Bedingungen darstellen. Hierdurch bedingt ist in vielen Fällen der elektrische Isolationswiderstand von Wärmegeräten erheblich geringer als in anderen elektrischen Anlageteilen.

Die VDE-Bestimmungen berücksichtigen diese Tatsache dadurch, daß der zulässige Isolationswiderstand in 220/380-Volt-Wärmegeräten gegenüber anderen Geräten herabgesetzt zugelassen wird.

5.2 Beleuchtung

Neben dem Tageslicht ist eine künstliche Beleuchtung in den Dunkelperioden oder für feine Arbeiten unerläßlich.

Die künstliche Beleuchtung wird heute fast ausschließlich durch Elektrizität sichergestellt.

Ein Maß für die Helligkeit der Beleuchtung ist die Beleuchtungsstärke (E mit der Maßeinheit Lux). Sie hängt von der auszuführenden Arbeit ab; je höher die Sehanforderungen desto größer die zu wählende Beleuchtungsstärke. Die DIN-Normen haben in Tabellenform Mindestbeleuchtungsstärken festgelegt.

Bei der elektrischen Beleuchtung unterscheidet man je nach Wirkungsweise

- Glühlampen
- Gasentladungslampen.

Glühlampen besitzen in einem gasgefüllten Glaskolben eine Metalldrahtwendel – meistens aus Wolfram –, welche bei Stromdurchgang auf ca. 3000 Grad C erhitzt wird und dabei weißglühend Licht aussendet.

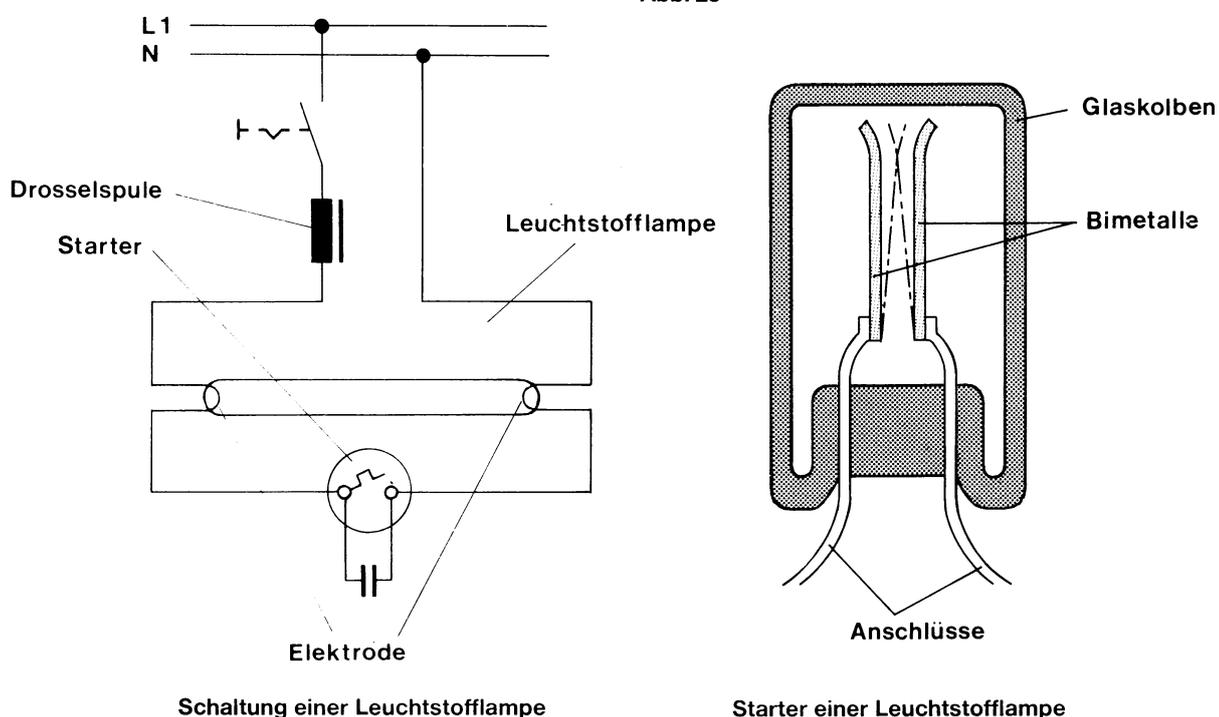
Eine Sonderform der Glühlampe ist die Halogenlampe. In dieser wird das durch die hohen Temperaturen verdampfte Wolfram in einem speziellen Kreislauf wieder auf die Wendel zurückgeführt. Hierdurch kann sich das Wolfram nicht auf dem Glaskolben niederschlagen und die Lichtausbeute der Lampe bleibt über die Lebensdauer fast konstant.

Gasentladungslampen bestehen aus einer mit einem Edelgas oder Quecksilber/ Natrium gefüllten Glasröhre, die an beiden Enden jeweils mit einer Elektrode versehen ist.

Während des Betriebes werden Quecksilber oder Natrium verdampft und bilden damit, wie bei den Edelgasen, über die freien Ionen eine stromleitende Brücke zwischen den Elektroden. Bei diesem Vorgang wird Licht ausgesendet.

Für Gasentladungslampen sind Vorschaltgeräte in Form von Drosselspulen oder anderen strombegrenzenden Widerständen notwendig, um eine Zerstörung der Lampe zu verhindern. Zusätzlich werden bei Leuchtstofflampen zur Vorwärmung der Elektroden Starter benötigt.

Abb. 25



Gasentladungslampen haben gegenüber Glühlampen einen erheblich höheren Wirkungsgrad (Lichtausbeute), da sie bei niedrigeren Temperaturen arbeiten. Außerdem ist hierdurch die Lebensdauer bis zu siebenmal größer als bei Glühlampen.

Das Farbspektrum der Gasentladungslampen ist je nach verwendetem Gas einseitig. So haben Niederdruck-Natriumdampflampen einen sehr hohen Gelbanteil, der alle anderen Farben verfälscht (mangelnde Identifizierbarkeit von z. B. Verkehrsschildern).

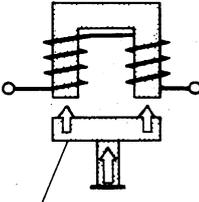
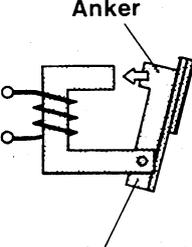
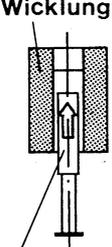
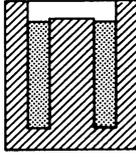
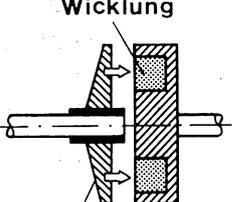
Um das von der Lampe ausgesendete Licht gewollt gerichtet auf den Arbeitsplatz/die Arbeitsfläche zu lenken, werden die Lampen in Leuchten eingesetzt, die über Reflektoren das Licht in die gewünschte Richtung bringen und ggf. über Streugläser/Blenden für Blendungsfreiheit sorgen.

5.3 Elektromagnete

Elektromagnete erzeugen eine Kraft z. B. zum

- Anheben einer Last,
- Betätigung eines Schützes oder Schalters,
- Lüften einer Federdruckbremse,
- Festspannen eines Werkstückes oder
- Betätigung einer elektromagnetischen Kupplung.

Tabelle 2:

	Kernmagnet	Kipphebelmagnet	Tauchanker-magnet	Topfmagnet	Ringspulmagnet
Aufbau	 Anker	 Anker Kipphebel	 Wicklung Anker		 Wicklung Anker
Anwendung	Bremslüftmagnet, Vibrator, Schütz	Schütz, Relais	Bremslüftmagnet, Spannmagnet	Spannmagnet (auch plattenförmig)	Kupplung

Elektromagnete

Elektromagnete werden speziell zur Anwendung im Gleichstrom- oder zur Verwendung im Wechselstromnetz ausgeführt.

Für hohe Schalthäufigkeiten verwendet man bevorzugt **Gleichstrommagnete**, da sie sich weniger stark erwärmen und sanft anziehen. Außerdem arbeiten sie geräuschloser.

Beim Abschalten des Gleichstrommagneten entsteht eine hohe Spannungsspitze durch Stromänderung (Selbstinduktion). Diese kann für spannungsempfindliche Geräte z. B. elektronische Bauelemente gefährlich werden.

Man begegnet dem durch Halbleiterdioden (Freilaufdioden) oder RC-Gliedern, einer Hintereinanderschaltung eines Widerstandes und eines Kondensators.

Wechselstrommagnete haben einen Eisenkern aus Elektroblechen mit besonders guten magnetischen Eigenschaften. Die Magnetspule hat weniger Windungen als gleichgroße Gleichstrommagnete, da der Wechselstromwiderstand relativ groß ist. Der Einschaltstrom bei Wechselstrommagneten kann ein Mehrfaches des Nennstromes erreichen. Daher sind Wechselstrommagnete für Dauereinschaltung mit geringer Schalzhäufigkeit gut geeignet.

Auftretende Spannungsspitzen, die im übrigen kleiner sind als bei Gleichstrommagneten, können durch RC-Glieder vermindert werden.

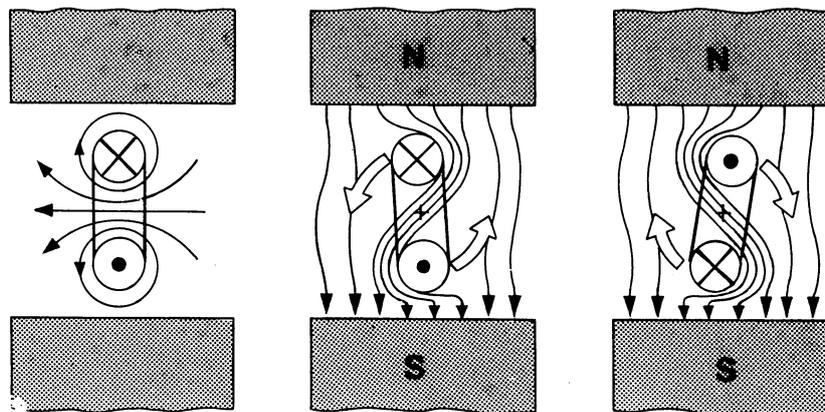
Im Prinzip arbeiten alle mit Elektromagneten versehene Bauteile, wie Schütze, Relais, Spannmagnete und Kupplungen wie beschrieben, jedoch ist die Bauform durch die Anwendung vorgegeben.

5.4. Elektromotoren

Allgemein gesehen besteht der Elektromotor aus feststehenden Magneten, die als Dauermagnete, oder mit Spulen versehene, als Elektromagnete in Form von Polen räumlich auf einen Kreis verteilt sind.

Zwischen den Polen unterschiedlicher Polarität besteht ein Magnetfeld. Wenn man zwischen die Pole freidrehbar eine Leiterschleife legt (Spule) und durch diese einen Strom fließen läßt, so wird sich um diese Spule ein weiteres Magnetfeld aufbauen. Diese Magnetfelder von Spule und feststehenden Polen haben das Bestreben sich auszugleichen und gleiche Richtung einzunehmen, d. h. beide Felder versuchen einen gleichen Feldlinienverlauf zu erreichen. Da die Pole feststehen, bedeutet dies, daß die Spule eine Drehbewegung ausführen muß.

Abb. 26

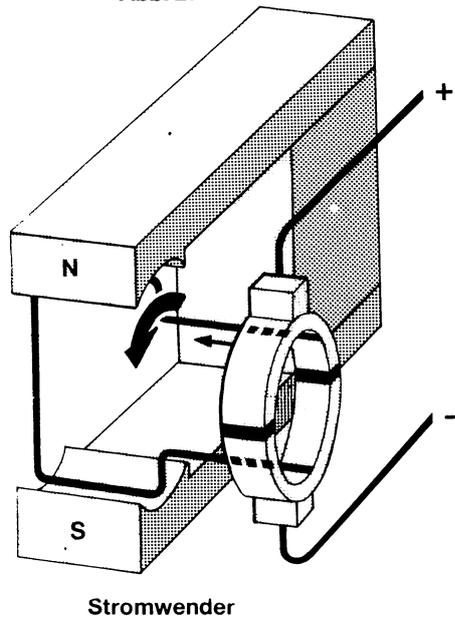


Entstehung eines Drehmomentes einer Spule im Magnetfeld

Die Anschlüsse der Spule sind über einen Stromwender (Kommutator) geleitet. Sobald das Feld der Spule durch die Drehbewegung gleichen Feldlinienverlauf zu dem äußeren Magnetfeld erreicht hat, schaltet der Stromwender

die Richtung des Stromes und damit die Richtung des Magnetfeldes um. Dadurch ergibt sich eine fortlaufende Drehbewegung und die Entstehung eines Drehmomentes als mechanische Kraft.

Abb. 27



Das vorgenannte Prinzip ist die Grundlage für alle elektrischen Maschinen:

- beim Motor die Erzeugung eines Drehmomentes durch den elektrischen Strom
- beim Generator in Umkehr die Erzeugung einer Spannung durch den Antrieb des Rotors.

Die wichtigsten Elektromotoren mit ihren Eigenschaften der Steuerbarkeit und Anwendungsbeispielen sind in der nachfolgenden Tabelle ausgeführt.

Tabelle 3

Stromart	Bezeichnung	Eigenschaften	Steuerbarkeit	Anwendungsbeispiele
Einphasen Wechselstrom	Universalmotor	Großes Anzugsmoment; hohe Drehzahl; für Gleich- und Wechselstrom;	1. Veränderung der Motorspannung; 2. Erregerwicklungsanzapfung; 3. Ankerparallelwiderstand	Haushaltsgeräte: Staubsauger Kaffeemühle Nähmaschine
	Induktionsmotor	Geräusch- und wartungsarmer, sehr preiswerter Motor	Drehzahlsteuerung schwierig und kaum angewandt	Kühlschrank, Kreissäge, Waschmaschine, Lüfter
Drehstrom	Dreiphaseninduktionsmotor (Asynchronmotor)	Sehr robust und preisgünstig, wartungsarm. Gute Drehzahlkonstanz bei Belastungsschwankungen. Größere Käfigläufer werden über Y/ Δ -Schalter, Schleifringläufer mit Läuferanlasser angefahren	1. Schlupfwiderstände im Läuferkreis verursachen Absinken der Drehzahl. Nachteile: Kennlinie wird weicher; es entstehen Verluste 2. Frequenzänderung durch Frequenzformer oder Thyristorwechselrichter 3. Polumschaltung für 2, seltener für 3 und mehr Drehzahlen	Der am häufigsten verwendete Elektromotor: Werkzeugmaschinen, Pumpen, Verdichter, Fördermaschinen, Lüfter, Zentrifugen, Rührwerke, Kollergänge, Hebezeuge
	Synchronmotor	Kein Selbstanlauf, daher asynchroner Hochlaufkäfig oder Anwurfmotor, Erregergleichspannung notwendig. Motor kann Blindleistung abgeben	Drehzahl starr an die Netzfrequenz gebunden	Dort angewandt, wo Drehzahlsteuerung nicht nötig und Leistungsfaktorverbesserung erwünscht: Große Leonardumformer, Pumpen und Verdichter
Gleichstrom	Nebenschlußmotor	Harte Kennlinie, geringe Drehzahlschwankungen bei Belastungsänderungen. Gut steuerbar, aber empfindlicher und etwa doppelt so teuer wie Asynchronmotor	1. Ankerspannungssteuerung: Drehzahl ist durch Veränderung der Ankerspannung vom Stillstand bis zur Nenn-drehzahl stufenlos steuerbar 2. Feldsteuerung; Durch Feldschwächung wird Drehzahl über die Nenn-drehzahl gesteigert	Für hochwertige Antriebe mit gesteuerter oder geregelter Drehzahl; Werkzeugmaschinen, Walzwerke, Papiermaschinen usw.

noch: Tabelle 3

Stromart	Bezeichnung	Eigenschaften	Steuerbarkeit	Anwendungsbeispiele
Gleichstrom	Reihenschlußmotor	Weiche Kennlinie, hohes Anzugsmoment. Motor geht bei völliger Entlastung durch, Riementrieb verboten	1. Ankerspannungssteuerung. 2. Feldschwächung über Wicklungsanzapfungen 3. Ankerparallelwiderstand 4. Bei mehreren Motoren Reihen-Parallelschaltung	Antriebe für Straßenbahnen, U- und S-Bahnen, O-Busse, Akkumulatorenfahrzeuge, Seilbahnen, Hebezeuge
	Doppelschlußmotor	Kennlinie liegt zwischen Neben- und Reihenschlußmotor. Der Verlauf läßt sich durch die Auslegung der Wicklungen beeinflussen	Drehzahlsteuerung wie beim Nebenschlußmotor	Dort angewendet wo Kennlinie des Nebenschlußmotors zu hart; Schwungradantriebe; z. B. Exzenterpressen

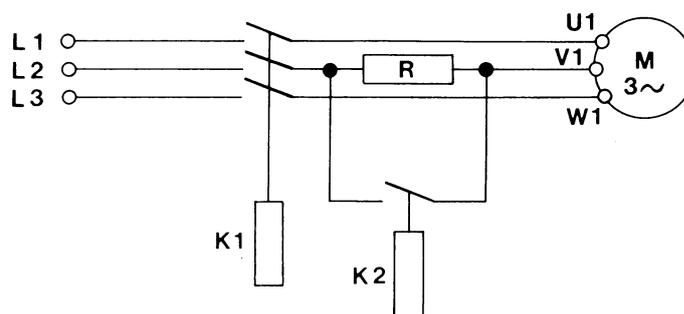
Die wichtigsten Elektromotoren

Für die weitaus größte Zahl der Anwendungsfälle werden Drehstrom-Asynchron-Motoren (Kurzschlußläufer-Motoren) eingesetzt.

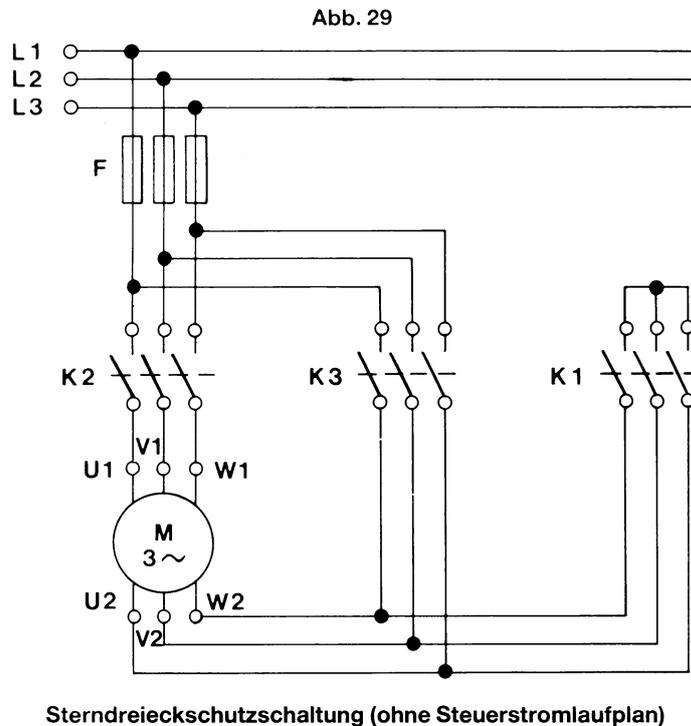
Durch ihren einfachen Aufbau, ihr großes Anzugsmoment und der Drehzahlkonstanz bei unterschiedlichen Belastungen sind diese für einfache Anwendungsfälle gut geeignet. Durch einen Umschalter (Tausch von 2 Außenleitern) läßt sich eine Drehrichtungsumkehr erreichen. Nachteile ergeben sich in einem schwachen Netz durch den hohen Anlaufstrom, der das 8–10fache des Nennstromes betragen kann. Daher wird die Direkteinschaltung derartiger Antriebe im allgemeinen auf die Leistung von ca. 7 kW begrenzt. Vorsicht bei Betrieb mit Netzersatzanlagen!

Eine Begrenzung des Anlaufstromes kann unter Inkaufnahme einer kurzzeitigen Verminderung des Anlaufmomentes auf ca. 1/3 des Nennmomentes durch Stern-dreieck-Schalter oder Zwischenschaltung eines Widerstandes in einem Außenleiter der Zuleitung (Kusa-Schaltung) erfolgen.

Abb. 28



Kusa-Schaltung



Die Nenndrehzahl der Drehstrom-Kurzschlußläufermotore ist abhängig von der Anzahl der Polpaare (1 Polpaar ca. 3000 l/min. bei 50 Hz, 2 Polpaare ca. 1500 l/min. usw.). Bei Ausführung von Spezialwicklungen (polumschaltbare Motore) kann mit Hilfe von Polumschaltern die Drehzahl entsprechend der Wicklungsauslegung verändert werden.

Soweit eine Steuerung der Drehzahl/des Drehmomentes von Elektromotoren verlangt wird, werden Asynchron-Schleifringläufer- oder Gleichstrommotoren eingesetzt. Mit diesen Maschinen kann man mit Hilfe von weiteren Steuerorganen (Widerständen, Frequenzumformern, Wechselrichtern) Drehzahl/Drehmoment weitgehend an die geforderten Antriebsverhältnisse anpassen.

Jeder Elektromotor besitzt ein Typenschild, auf dem die wichtigsten Daten der Maschine vermerkt sind.

Für den Anschluß des Motors an das Netz sind diese Daten zu berücksichtigen.

Wichtig sind

- Leistung
- Anschlußspannung
- Nennstrom
- Drehzahl
- Leistungsfaktor ($\cos \varphi$)

und je nach Motorart

- Spannung und Strom der Feldwicklung bei Gleichstrommotoren
- Spannung und Strom des Läufers bei Schleifringläufermotoren

Abb. 30

Hersteller	
Typ DA 80	
D-Motor	Nr 7660
Δ 380 V	187 A
100 kW S3	cos φ 0,89
1460 /min	50 Hz
Läufer Υ	245V 248A
Isol.-Kl. B	IP44 1,1 t
VDE 0530/11.72	

Anschlußspannung
(Spulenspannung)

Leistung

Drehzahl

Nennstrom

Leistungs-
faktorStrom des
Läufers

Spannung des Läufers

Leistungsschild eines Schleifringläufermotors

5.5 Transformatoren

Der Transport elektrischer Energie über Leitungen bedingt einen Verlust entsprechend der Stromstärke. Besonders bei größeren Leistungen ist man daher bestrebt, den Strom klein zu halten. Nach der Formel über die Leistung ($P = U \cdot I$) ist eine Erhöhung der Spannung bei Wechsel- oder Drehstrom durch Umspannung über Transformatoren möglich. Entsprechend der Leistungsformel vermindert sich der Strom.

Transformatoren bestehen aus einem aus Elektroblechen geschichteten Kern, der im Grundsatz zwei Wicklungen aufnimmt. Die Eingangswicklung (Primärwicklung) erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, welches in der Ausgangswicklung (Sekundärwicklung) eine Spannung induziert.

Die Spannungen von Eingang zu Ausgang verhalten sich direkt proportional zu den Windungen der beiden Wicklungen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

U_1 = Primärspannung

U_2 = Sekundärspannung

N_1 = Anzahl der Windungen der Primärwicklung

N_2 = Anzahl der Windungen der Sekundärwicklung

Da die Leistung unter Vernachlässigung des Wirkungsgrades auf Eingangs- und Ausgangsseite gleich bleibt, wird im umgekehrt proportionalen Verhältnis der Strom transformiert.

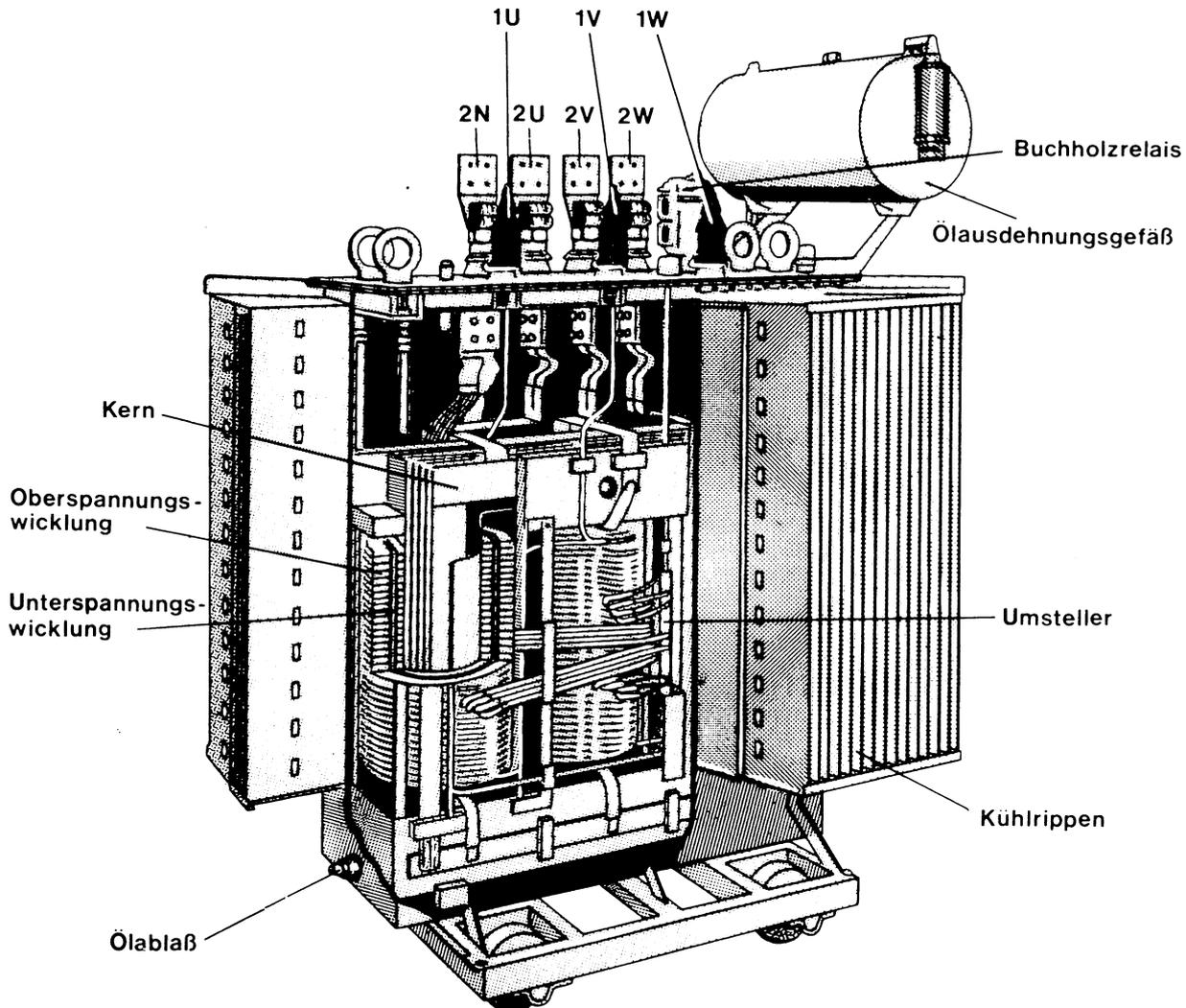
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Transformatoren werden überwiegend in ausgedehnten Netzen eingesetzt. Sie transformieren die Spannung der Generatoren im Kraftwerk auf hohe Übertragungsspannungen und setzen diese Spannungen in Versorgungsschwerpunkte/ Umspannwerken auf Spannungen der mittleren Netzebene und in Verbraucher- und Ortsnetzstationen auf die ortsübliche Spannung (Niederspannung) herab.

Darüber hinaus werden Transformatoren in Schalt- und Steueranlagen zur Netz-trennung, für Gerätestromversorgung und als Schweißtransformator verwendet.

Bei Hochspannung ist auf die elektrische Isolation großen Wert zu legen. Drehstromtransformatoren großer Leistung haben meist einen Ölkessel mit Kühlrippen, in dem Kern und Wicklung untergebracht sind. Das Öl führt die Wärme besser ab als Luft, es isoliert besser und verhindert Feuchtigkeitszutritt.

Abb. 31



Drehstromtransformator 250 kVA

Darüber hinaus verwendet man Gießharztransformatoren ohne Ölfüllung, wo aus Sicherheitsgründen Öltransformatoren nicht zulässig sind (z. B. in Werkhallen).

Auf jedem Leistungstransformator ist ein Typenschild angebracht.

Hierauf ist u. a. angegeben:

- Nennleistung
- Nennspannung der Ober- und Unterspannungsseite
- Nennstrom
- Frequenz
- Kurzschlußspannung
- Schaltgruppe

Abb. 32

Hersteller							
Typ		Nr.		Baujahr	1985	VDE 0532	
Nennleistung	kVA	160	Art	LT	Frequenz	Hz	50
	I	20 800			Betrieb		S1
Nennspg. V	II	20 000		400	Schaltgr.		Yz5n
	III	19 200			Reihe		20
Nennstrom	A	4,62		231	Isol.- Kl.		
Kurzschl.- Spg. %		4,1	Kurzschl.- Strom		kA		
Schutzart		—	Kurzschl.- Dauer max.		s	1,8	
Kühlungsart		S					
Ges.- Gew.	t	1,0	Öl- Gew.	t	0,27		

Typenschild

Da Netztransformatoren in Netzen von verschiedener Ausdehnung eingesetzt werden, wird es notwendig, die unterschiedlichen Spannungsfälle in diesen Netzen auszugleichen. Hierzu sind bei Netztransformatoren Stufenschalter oder Wicklungszapfungen vorhanden, an denen in gewissen Grenzen ($\pm 4\%$) die Spannung eingestellt werden kann.

5.6

Gleichrichter

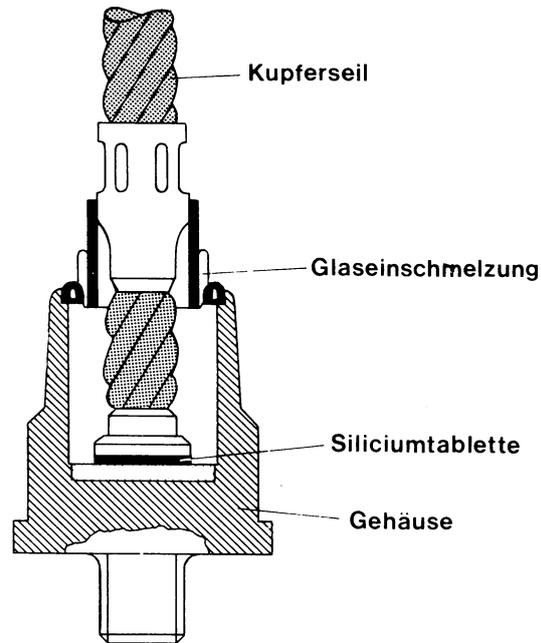
Ursprünglich erfolgte die Versorgung der Bezieher von elektrischem Strom mit Gleichstrom. Da sich Gleichstrom jedoch nicht auf höhere Nennspannungen umformen (transformieren) läßt und deshalb eine Übertragung höherer Leistung nicht möglich ist, wurden im Laufe der Zeit Gleichstromnetze durch Wechsel-/Drehstromnetze ersetzt.

Heute sind Gleichstromkreise noch als Straßen- und U-Bahnnetze und bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) in Betrieb. Daneben sind nach wie vor galvanische Elemente z. B. Trockenbatterien (Primärelemente) bzw. Sammler, auch Akkumulatoren genannt (Sekundärelemente) in Gebrauch.

Zur Ladung von Akkumulatoren benötigt man Gleichrichter, welche den Wechsel- bzw. Drehstrom in Gleichstrom umwandeln. Diese sind Bestandteil eines Ladegerätes.

Ein Ladegerät besteht im allgemeinen aus einem Transformator, welcher die Netzspannung auf die benötigte Ausgangsspannung umformt, und nachgeschalteten Dioden als Gleichrichter.

Abb. 33



Silicium-Leistungdiode

Im Gleichstromkreis des Ladegerätes sind zusätzlich noch Kondensatoren und Spulen vorhanden, die eine Glättung und Konstanz der Gleichspannung an den Ausgangsklemmen bewirken.

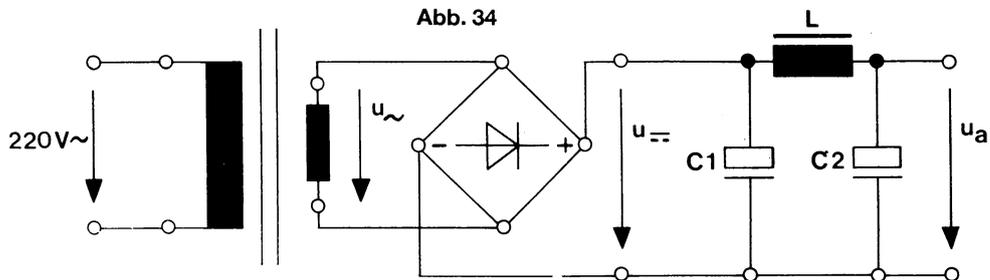
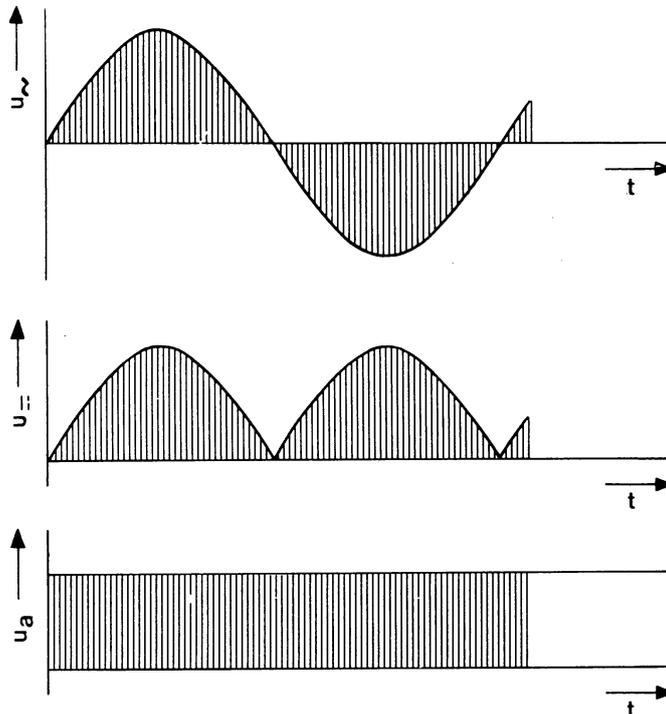


Abb. 34



Innenschaltung eines Netz-/Ladegerätes mit Transformator, Gleichrichter, Kondensatoren und Drosselspule

Die erzeugte Gleichspannung versorgt dann entweder direkt die angeschlossenen Verbraucher (z. B. elektronische Geräte, Fernmeldeanlagen), lädt den Akkumulator auf (z. B. in Batteriehandleuchten, Starterbatterien) und findet Verwendung bei galvanischen Anlagen (z. B. Eloxalverfahren, Gewinnung reiner Metalle).

5.7

Wechselrichter

Wird es erforderlich, handelsübliche Geräte (z. B. Leuchten), welche gewöhnlich mit normaler Netzspannung versorgt werden, im Notfall aus Batterieanlagen zu speisen, setzt man Wechselrichter ein.

Diese formen mittels elektronischer Bauelemente Gleichstrom in Wechselstrom um. Die erzeugte Spannung kann durch Einsatz von Transformatoren auf die normale Netzspannung transformiert werden. Soweit die Frequenz der erzeugten Wechselspannung für die Anwendung keine Bedeutung hat, erzeugt man bei der Wechselrichtung Wechselspannung mit sehr viel höherer Frequenz. Diese ist mit Hilfe der Elektronik leichter realisierbar und läßt für die Transformatoren eine kleinere Bauform zu.

Wechselrichter benötigt man u. a. zum Betrieb von Leuchtstofflampen an Batterieanlagen mit kleiner Gleichspannung (z. B. Innenleuchte im Kombi des leichten Bergungstrupps).

Wechselrichter größerer Leistung finden Anwendung in der Leistungselektronik bei der Drehzahlregelung von Antrieben und in den Kopfstationen der Hochspannungs-Gleichstromübertragung zur Erzeugung von Drehstrom beliebiger Frequenz aus dem Gleichstromkreis.

Anhang

Vorsatzzeichen für Einheiten

Die Größe der Maßeinheit wird häufig mit folgenden Vorsatzzeichen ausgedrückt:

T (Terra)	= 10^{12}	mal = 1.000.000.000.000	mal
G (Giga)	= 10^9	mal = 1.000.000.000	mal
M (Mega)	= 10^6	mal = 1.000.000	mal
K (Kilo)	= 10^3	mal = 1.000	mal
h (Hekto)	= 10^2	mal = 100	mal
da (Deka)	= 10^1	mal = 10	mal
<hr/>			
d (Dezi)	= 10^{-1}	mal = $\frac{1}{10}$	mal
c (Zenti)	= 10^{-2}	mal = $\frac{1}{100}$	mal
m (Milli)	= 10^{-3}	mal = $\frac{1}{1.000}$	mal
μ (Mikro)	= 10^{-6}	mal = $\frac{1}{1.000.000}$	mal
n (Nano)	= 10^{-9}	mal = $\frac{1}{1.000.000.000}$	mal
p (Piko)	= 10^{-12}	mal = $\frac{1}{1.000.000.000.000}$	mal
f (Fento)	= 10^{-15}	mal = $\frac{1}{1.000.000.000.000.000}$	mal
a (Atto)	= 10^{-18}	mal = $\frac{1}{1.000.000.000.000.000.000}$	mal

Beispiele:

Gemessene Anzahl x Faktor des Vorsatzzeichens der Meß-Einheit Bezeichnung

3	$\times 10^{-2}$	m	= 3 cm
50	$\times 10^{-3}$	Hz	= 50 kHz
200	$\times 10^{-3}$	A	= 200 mA

Griechisches Alphabet

Buchstaben des griechischen Alphabets werden häufig zur Bezeichnung von Maßeinheiten verwendet (z. B. Ω = Ohm, λ = Lambda (Wellenlänge)). Es enthält folgende Buchstaben:

Alpha	-	A	α
Beta	-	B	β
Gamma	-	Γ	γ
Delta	-	Δ	δ
Epsilon	-	E	ϵ
Zeta	-	Z	ζ
Eta	-	H	η
Theta	-	Θ	θ
Jota	-	I	ι
Kappa	-	K	κ
Lambda	-	Λ	λ
My	-	M	μ

Ny	-	N	ν
Xi	-	Ξ	ξ
Omikron	-	O	\omicron
Pi	-	Π	π
Rho	-	P	ρ
Sigma	-	Σ	σ
Tau	-	T	τ
Ypsilon	-	Y	υ
Phi	-	Φ	ϕ
Chi	-	X	χ
Psi	-	Ψ	ψ
Omega	-	Ω	ω

Kennzeichnung der Betriebsmittel

- C Kondensatoren
- E Verschiedenes (z. B. Leuchten, Heizgeräte)
- F Schutzeinrichtungen (z. B. Sicherungen)
- G Generatoren
- H Meldeeinrichtungen (z. B. Meldeleuchten, Heizgeräte)
- K Relais, Schütze
- L Induktivitäten (z. B. Drosselspulen)
- M Motoren
- Q Leistungsschalter
- R Widerstände
- S Schalter
- T Transformatoren
- X Klemmen, Stecker, Steckdosen

Verwendete Größen mit Formelzeichen, Einheit und Beziehungen

– Gesetzliche Einheiten (SI-Basiseinheiten)

Größe	Formelzeichen	Einheit	Kurzzeichen	Beziehungen, Bemerkungen
Länge	l	Meter	m	
Zeit	t	Sekunde	s	
Stromstärke	I	Ampère	A	Augenblickswert d. Stromstärke maximaler Augenblickswert (Scheitelw.) Effektivwert der Stromstärke bei Wechselstrom $I_{\text{eff}} = I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{i}}{1,414} = 0,707 \cdot \hat{i}$ $\approx 70\% \cdot \hat{i}$
	i	Ampère	A	
	\hat{i}	Ampère	A	
	I_{eff}	Ampère	A	

– Abgeleitete Einheiten

Ladung	Q	Coulomb	C	1 C = 1 As
Spannung	U	Volt	V	Augenblickswert d. Spannung Scheitelwert d. Spannung Effektivwert der Spannung bei Wechselspannung $U_{\text{eff}} = U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{1,414} = 0,707 \cdot \hat{u}$ $\approx 70\% \cdot \hat{u}$
	u	Volt	V	
	\hat{u}	Volt	V	
	U_{eff}	Volt	V	
Widerstand	R	Ohm	Ω	$R = \frac{U}{I} \quad U = R \cdot I \quad I = \frac{U}{R}$ $1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$

Größe	Formelzeichen	Einheit	Kurzzeichen	Beziehungen, Bemerkungen
spezifischer Widerstand	ϱ		$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\varrho = \frac{R \cdot A}{l}$ $\varrho = \frac{1}{\kappa}$
spezifischer Leitwert	κ		$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	$\kappa = \frac{1}{R \cdot A}$ $\kappa = \frac{1}{\varrho}$
Querschnitt	A	Quadratmillimeter	mm ²	
Kapazität	C	Farad	F	$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}}$
kapazitiver Blindwiderst.	X_C	Ohm	Ω	$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$
Induktivität	L	Henry	H	$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$
induktiver Blindwiderst.	X_L	Ohm	Ω	$X_L = \omega L = 2\pi f L$
Scheinwiderst.	Z	Ohm	Ω	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Frequenz	f	Hertz	Hz	f = Anzahl der Perioden pro Sekunde $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{\text{s}}$
Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit	ω	1/Sekunde	$\frac{1}{\text{s}}$	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
Wellenlänge	λ	Nanometer	nm	$= \frac{c}{f}$; c = Lichtgeschwindigkeit c 300.000 km/s
Phasenwinkel	φ	Grad Radiant (Bogenmaß)	° rad	
Leistung	P	Watt	W	$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$ $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ VA}$
Arbeit	W	Joule Kilowattstunde	J kWh	$W = P \cdot t$ $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ Ws}$ $1 \text{ kWh} = 1.000 \text{ Wh} = 3.600.000 \text{ Ws} = 3.600.000 \text{ J} = 3.600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$

Im Wechselstromkreis

Scheinleistung	P_S	Voltampère	VA	$P_S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = U \cdot I$ $1 \text{ VA} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$
Blindleistung	P_q	Voltampère reaktiv	var	$P_q = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff} q} = U \cdot I_q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$
Wirkleistung	P	Watt	W	$p = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff} w} = U \cdot I_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Im Drehstromkreis: (nur bei symmetrischer Lastaufteilung!)

Scheinleistung	P_S	Voltampère	VA	$P_S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = 1,73 \cdot U \cdot I$
Blindleistung	P_q	Voltampère reaktiv	var	$p_q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi$
Wirkleistung	P	Watt	W	$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$
Kraft	F	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{J}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{m}}$
Beleuchtungs- stärke	E	Lux	lx	
Windungszahl	N	—	—	Windungszahl bei einer Spule bzw. einem Transformator

Zusammenstellung von wichtigen Schaltzeichen

	Gleichgröße		Wechselgröße
	Dreiphasengröße		Lösbare Verbindung (z. B. Klemmstelle)
	Nichtlösbare Verbindung (z. B. Lötstelle)		Gleichspannungsquelle
	Batterie		Wechselspannungsquelle
	Generator		Motor
	Gleichstrommotor		Wechselstrommotor
	Allstrommotor		Drehstrommotor
	Voltmeter		Ampèremeter
	Meldeleuchte		Leuchte
	Sicherung		Ohmscher Widerstand (Wirkwiderstand)
	Scheinwiderstand		Spule, Induktiver Widerstand
	Spule mit Eisenkern (z. B. mit Drossel)		Transformator (Eisenkern aus einzelnen Blechen)
	Kondensator, kapazitiver Widerstand		Elektrolytkondensator (gepolt)

