

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

GRÄSSLER/HENNIG

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHELEKTRO- TECHNIKER

1

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAVS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-01/62

Herausgeber:
Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 1

von

Dipl.-Ing. oec. Rolf Gräßler und Dipl.-Gwl. Raimund Hennig

2. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 313 /62

Best.-Nr. 5030-01/62

III, 9/278

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	3
1. Grundgesetze des Gleichstroms	5
1.1. Strom	5
1.1.1. Vom Wesen der Elektrizität	5
1.1.2. Wirkungen des Stromes	11
1.1.3. Elektrizitätsmenge, Stromstärke, Stromdichte, Einheiten	13
1.1.4. Messung der Stromstärke, Schaltung des Strommessers	18
1.1.5. Die Gefahren des elektrischen Stromes	23
1.2. Spannung	24
1.2.1. Vom Wesen der Spannung	24
1.2.2. Ursprung und Spannungsabfall	25
1.2.3. Die wichtigsten Erzeugungsarten der Ursprung	28
1.2.4. Wirkungen der Spannung	33
1.2.5. Einheit der Spannung	35
1.2.6. Messung der Spannung, Schaltung des Spannungsmessers	36
1.3. Widerstand	40
1.3.1. Was wird mit Widerstand bezeichnet?	40
1.3.2. Das Ohmsche Gesetz	44
1.3.3. Widerstandsbemessungsgleichung	47
1.3.4. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	51
1.3.5. Technische Ausführungsformen von Widerständen	57
Antworten und Lösungen	63
Literaturnachweis	67
Quellenverzeichnis der Bilder	67

Vorwort =====

Sie beginnen jetzt mit dem Studium der Lehrbriefreihe "Grundlagen der Elektrotechnik" und werden vielleicht die Frage stellen, ob es notwendig ist, daß Sie als Nichtelektrotechniker dies tun müssen. Dazu ist zu sagen, daß man sich einen sozialistischen Ingenieur, der Sie ja werden wollen, ohne grundlegende Kenntnisse in der Elektrotechnik überhaupt nicht vorstellen kann. Es gibt kaum eine zweite technische Wissenschaft, die eine so rasche und für das Leben des Einzelnen und für die Gesellschaft so bedeutungsvolle Entwicklung genommen hätte, wie die Elektrotechnik mit all ihren Zweiggebieten. Es gibt im Leben unserer Gesellschaft kaum ein Gebiet, das nicht von der Elektrotechnik in irgend einer Form beeinflußt und befruchtet würde.

Auch Sie kommen zu Hause und in Ihrer betrieblichen Tätigkeit ständig mit elektrotechnischen Vorgängen in Berührung. Fast alle Maschinen und Geräte in Ihrem Betrieb oder Haushalt werden durch Elektromotore oder durch andersartige Anwendung der elektrischen Energie betrieben. Vielfach verwendet man zur Steuerung von großen Aggregaten elektrische Energie. Es ist schon keine Utopie mehr, daß ganze Fabrikanlagen durch elektrische Steuerungen automatisch arbeiten. Deshalb ist es unbedingt notwendig, daß sich alle Ingenieure, besonders die in der Ausbildung befindlichen, mit den Gesetzmäßigkeiten der Elektrotechnik vertraut machen, damit sie die Vorgänge und Einrichtungen verstehen und von ihrem speziellen Fachgebiet her zur Einführung der neuen Technik und ihrer Weiterentwicklung beitragen können.

Beim Studium der Lehrbriefreihe beachten Sie bitte, daß Sie vor allem die Grundbegriffe richtig erkennen. Lernen Sie nicht schematisch "Formeln" auswendig, sondern versuchen Sie, die elektrischen Vorgänge richtig zu begreifen. Die Grundbegriffe sind in dieser Lehrbriefreihe im Gegensatz zu dem übrigen Stoff, ziemlich breit behandelt worden, weil es vor allem darauf ankommt, die grundlegenden elektrischen Vorgänge zu "begreifen" und nicht schematisch nur für die Prüfung

"einzupauken".

Bei den meisten Fernschülern kommt das beste Verständnis für den Stoff beim Rechnen von Lehrbeispielen; deshalb sind auch mehrere in diese Lehrbriefreihe eingearbeitet worden. Lassen Sie aber bei Ihren Berechnungen keine Dimensionen weg, sondern führen Sie die Lösungen wie in unseren Lehrbeispielen durch! Sie ersparen sich dadurch sehr viele Fehler.

Wenn Sie die Gründe für die Notwendigkeit und die Hinweise zur Art und Weise des Studiums der Elektrotechnik beachten, werden Sie dabei für Ihre Tätigkeit in der sozialistischen Praxis die notwendigen Erfolge erzielen.

1. Grundgesetze des Gleichstroms

=====

1.1. Strom

1.1.1. Vom Wesen der Elektrizität

Das Wort "Elektrizität" führt man auf das griechische Wort "elektron" (deutsch: Bernstein) zurück. Im Physikunterricht haben Sie bestimmt den Versuch kennengelernt, bei dem Bernstein Papierschnitzel anzieht, wenn er mit einem wollenen Tuch gerieben wird. Dieser Versuch war schon im Altertum bekannt. Man hat die Energieform, die durch das Reiben des Bernsteins entsteht, mit dem Namen Elektrizität bezeichnet. Was sind nun die Bausteine, die Träger der Elektrizität?

Um diese Frage zu beantworten, ist es notwendig, daß Sie sich noch einmal die Grundzüge des Atomaufbaus, die Sie in der Lehrbriefreihe "Physik" kennengelernt haben, ins Gedächtnis zurückrufen. Betrachten wir uns dazu das einfachste Atom, das Wasserstoffatom (Bild 1).

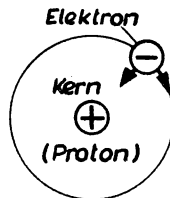


Bild 1: Modell des Wasserstoffatoms

Jedes Atom besteht aus dem Atomkern und der Atomhülle, wobei der Kern positiv und die Hülle negativ elektrisch geladen ist. Beim Wasserstoffatom hat der Atomkern eine positive Ladung und die Atomhülle eine negative Ladung. Träger der positiven Ladung des Kerns sind die Protonen (der Kern des Wasserstoffatoms besteht u.a. aus einem Proton) und Träger der negativen Ladung der Hülle die Elektronen. (Die Hülle des Wasserstoffatoms besteht aus einem Elektron, das den Atomkern umkreist.) Beim Heliumatom weist der Kern zwei positive Ladungen (zwei Protonen) und die Hülle zwei negative Ladungen

(zwei Elektronen) auf. Beide Elektronen kreisen auf einer Bahn, die zu einer gemeinsamen "Schale" gehört. (Bild 2).

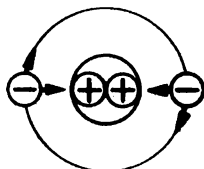


Bild 2: Modell des Heliumatoms

Aus dem Studium der Lehrbriefreihe "Chemie" kennen Sie das periodische System der Elemente. Sie wissen, daß man die Elemente in das Periodensystem nach Ordnungszahlen einreicht. Dabei ist die Ordnungszahl gleich der positiven Kernladung, also gleich den Protonen im Atomkern. Der Wasserstoff hat demnach die Ordnungszahl 1 und das Helium die Ordnungszahl 2. Mit steigender Ordnungszahl vergrößert sich auch die Masse der Atome. So ist die Masse des Heliumatoms doppelt so groß wie die des Wasserstoffatoms. Mit steigender Ordnungszahl erhöht sich aber auch die Anzahl der Elektronen, die den Atomkern auf Schalen umkreisen, denn zwischen Ordnungszahl, Anzahl der Protonen und Elektronen besteht folgender Zusammenhang:

$$\text{Protonenzahl} = \text{Elektronenzahl} = \text{Ordnungszahl}.$$

Nach dem Periodensystem der Elemente von Mendelejew und Meyer kennt man 92 Arten von natürlichen Elementen; den Atomkern des Elements mit der Ordnungszahl 92 (Uran) umkreisen demnach 92 Elektronen. Sie können sich das bildlich vorstellen, wenn Sie an die Schalen einer Zwiebel denken. Auf der ersten Schale (K-Schale) können maximal 2 Elektronen kreisen, auf der zweiten Schale (L-Schale) dagegen schon 8 usw. (Genaueres ersehen Sie aus den Chemielehrbriefen.) Je weiter die Elektronenschalen vom Atomkern entfernt sind, um so weniger werden die einzelnen Elektronen vom Atomkern angezogen, und es ist möglich, sie durch äußere Kräfte aus ihrer Bahn zu lenken.

Am leichtesten reagieren auf diese äußeren Einflüsse die Elektronen auf der äußersten Schale, die man auch die Valenzelektronen nennt. Valenzelektronen ist ein Ausdruck der Chemie, Sie haben ihn bei der Bestimmung der Wertigkeit der einzelnen Elemente kennengelernt. In der Elektrotechnik bezeichnet man sie als freie Elektronen. Läßt man z.B. Wärme, Licht, Reibung, Magnetismus oder chemische Kräfte auf ein Atom einwirken, dann ist es möglich, die freien Elektronen (die Elektronen der äußeren Schale) aus ihrer Bahn zu bringen. Bei diesem Aus-der-Bahn-Bringen sind zwei Formen möglich:

- a) Die Elektronen beginnen zu schwingen und werden dabei von Atomverband zu Atomverband weitergereicht. Es entsteht dabei aber keine freie Ladung, weil bei diesem Weiterreichen die abgewanderten Elektronen sofort durch nachstoßende Elektronen ersetzt werden. Die einzelnen Atome bleiben elektrisch neutral.
- b) Die Elektronen werden aus dem Atomverband herausgerissen und setzen sich an die Atome anderer Elemente an. In diesem Falle sind die Atome nicht mehr elektrisch neutral, sondern bei den Atomen, denen Elektronen entrissen wurden, überwiegt die positive Kernladung (diese Atome sind positiv elektrisch geladen), und bei den anderen Atomen, an die sich zusätzliche Elektronen angesetzt haben, überwiegt die negative Elektronenladung (sie sind negativ elektrisch geladen). Elektrisch geladene Atome bezeichnet man als Ionen.

Somit haben Sie die Träger der Elektrizität kennengelernt. Man unterscheidet also zwei Arten von Trägern der Elektrizität:

das unter a) geschilderte sogenannte freie Elektron. Es stellt mit seiner negativen Ladung, die bei allen Elektronen gleich groß ist, die kleinste Elektrizitätsmenge dar und wird auch als Elektrizitätsquant bezeichnet. Es ist der Baustein der elektrischen Vorgänge;

das unter b) geschilderte Ion. Ionen sind Atome oder Atomgruppen, denen Elektronen fehlen oder zuviel anhaften. Dadurch weisen sie eine bestimmte (positive oder negative) elektrische Ladung auf. Ionen sind Materiebausteine mit elektrischer Ladung.

In der Elektrotechnik spielt der Transport, die Fortleitung von Elektrizitätsmengen eine zentrale und entscheidende Rolle. Deshalb sind beide Arten der freibeweglichen Träger von Elektrizitätsmengen - kurz Ladungsträger genannt - für die Elektrotechnik von großer Bedeutung. Da diese freibeweglichen Ladungsträger nur in ganz bestimmten Stoffgruppen in genügender Anzahl auftreten, kann man zur Fortleitung der Elektrizität nur solche Stoffgruppen verwenden.

Man bezeichnet Stoffe mit vielen beweglichen Elektrizitätsträgern als Leiter. Stoffe, die sehr wenig oder keine Elektrizitätsträger enthalten, heißen Nichtleiter oder Isolatoren.

Je nach der Art der Fortleitung von Elektrizitätsmengen unterscheidet man zwischen

Leitern I. Klasse,	Ladungsträger: Elektronen (Elektronenleitung) und
Leitern II. Klasse,	Ladungsträger: Ionen (Ionenleitung).

Wie bereits erwähnt, spielt in der Elektrotechnik die Fortleitung der Elektrizitätsmengen, die Erscheinung des Dahinströmens von "Elektrizitätsmengen" (Elektronen), eine entscheidende Rolle. Diese Erscheinung ist das "Kernstück" der gesamten Elektrotechnik, das ist der elektrische Strom.

Elektrischer Strom = dahinströmende Elektrizitätsmengen
(vergleiche: Luftstrom = dahinströmende Luftmengen,
Wasserstrom = dahinströmende Wassermengen)

Betrachten wir den elektrischen Strom im Leiter.

Die Leiter I. Klasse, das sind alle Metalle und Kohle, ver-

Ändern sich nicht durch die dahinströmenden Elektrizitäts-
mengen, sondern wir stellen uns die Leitung des elektrischen
Stromes so vor, daß durch die strömenden Elektrizitätsmengen
die sogenannten freien Elektronen der einzelnen Atome sehr
stark schwingen und dabei die freien Elektronen der benach-
barten Atome anstoßen.

Dieser Strömungssignal pflanzt sich mit sehr großer Geschwin-
digkeit (300 000 km/s) fort und ist so stark, daß die Elek-
tronen aus dem Atomverband herausgerissen werden und sich an
fremde Atome wieder ansetzen. Durch dieses Weiterreichen der
Elektronen von einem Atomverband zum anderen entstehen aber
keine freien Ladungen, weil dieser Vorgang nur ein Verdrängen
der einzelnen Elektronen ist und sofort an die Stelle des
verdrängten Elektrons ein neues tritt. Die Geschwindigkeit
der Vorwärtsbewegung der Elektronen ist meist kleiner als
1 mm/s. Bildlich können Sie das Weiterreichen der Elektronen
und die Fortpflanzung des elektrischen Stromes mit der Strö-
mung des Wassers in einer Rohrleitung vergleichen. Sie füllen
z.B. in ein U-förmig gebogenes Glasrohr mit ungleich langen
Schenkeln Wasser, und zwar so, daß der kurze Schenkel bis
zum Überlaufen gefüllt ist. Wenn Sie nun in den noch nicht
vollen Schenkel gefärbtes Wasser gießen, dann merken Sie, daß
nach dem Einfüllen der volle kurze Schenkel sofort überläuft,
obwohl durch die Färbung klar ersichtlich ist, daß das neu
zugegossene Wasser sich noch im anderen Schenkel befindet.
Das, was sich jetzt mit ungeheurer großer Geschwindigkeit im
Rohr fortpflanzt, ist nicht das neu hinzugegossene Wasser,
sondern sein Druck, mit dem es auf das bereits vorhandene
wirkt.

Bei derartigen Analogiebetrachtungen dürfen Sie natürlich
niemals vergessen, daß zwischen diesen beiden Erscheinungen
(Wasserstrom und elektrischer Strom) grundsätzliche Unter-
schiede bestehen. Während z.B. die Ursache für das Zustande-
kommen des Wasserstromes die Schwerkraft der Erde ist, liegen
die Verhältnisse beim elektrischen Strom ganz anders, was Sie
später noch erkennen werden. Nehmen Sie diesen Vergleich da-

her nur als Hilfsvorstellung.

Bei den Leitern II. Klasse - das sind bestimmte Flüssigkeiten, sogenannte Elektrolyte - ist der Träger der dahinströmenden Elektrizitätsmenge das gesamte geladene Atom, das Ion. Die dahinströmenden Elektrizitätsmengen bei Leitern II. Klasse sind, genauso wie bei Leitern I. Klasse, von einem Strömungsimpuls begleitet, der sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Mit den dahinströmenden Elektrizitätsmengen bei Leitern II. Klasse ist also gleichzeitig nachweisbarer Masse-transport verbunden.

Bevor Sie die Wirkungen des elektrischen Stromes kennenlernen, sollen Sie zunächst mehr informatorisch erfahren, welche Bedingungen überhaupt erfüllt sein müssen, damit ein Strom zustande kommt.

a) Es muß eine Spannungsquelle vorhanden sein. In ihr wird die elektrische Spannung (Ursache für den Strom) erzeugt. Die Spannungsquelle enthält zwei Pole, die sich dadurch unterscheiden, daß auf dem einen Pol mehr Elektronen vorhanden sind als auf dem anderen.

b) Ferner benötigt man noch einen elektrischen Leiter.

Verbindet man die beiden Pole der Spannungsquelle mittels dieses Leiters (z.B. eines Kupferdrahtes), so erfolgt ein Ausgleich der Elektronen zwischen den unterschiedlichen Polen der Spannungsquelle durch den Leiter - es fließt ein Strom. (Dieser Leiter ist in der Praxis irgend ein elektrisches Gerät - ein Verbraucher.) Jeder Leiter widersetzt sich dem Stromdurchgang, er bietet dem Strom einen Widerstand, der zur Aufrechterhaltung des Stromes von der Spannung überwunden werden muß. Dadurch wird Spannung verbraucht. In Bild 3 ist in einer Schaltskizze die Bedingung für das Zustandekommen eines Stromes dargestellt; es ist der geschlossene Stromkreis. Dabei lernen Sie auch die symbolische Darstellung für die Spannungsquelle und den Widerstand kennen.

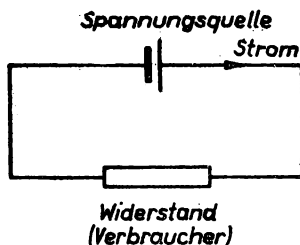


Bild 3: Stromkreis

1.1.2. Wirkungen des Stromes

Mit unseren Sinnesorganen ist der elektrische Strom nicht direkt wahrnehmbar. Sie können ihn weder schmecken, sehen noch riechen. Er hat aber bestimmte Begleiterscheinungen oder Wirkungen, die es ermöglichen, daß man ihn beobachten bzw. auch messen kann.

Weiter oben wurde gesagt, der elektrische Strom sei das "Kernstück" der gesamten Elektrotechnik. Diese Feststellung muß an dieser Stelle ergänzt und präzisiert werden: Das, worauf sich die gesamte Elektrotechnik aufbaut, sind die Wirkungen des elektrischen Stromes. In allen elektrotechnischen Geräten und Maschinen werden diese Wirkungen ausgenutzt.

Die hauptsächlichsten Begleiterscheinungen oder Wirkungen sind:

- 1.1.2.1. die Wärmewirkung des elektrischen Stromes,
- 1.1.2.2. die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes,
- 1.1.2.3. die chemische Wirkung des elektrischen Stromes.

Zu 1.1.2.1. Wärmewirkung

Der elektrische Strom entwickelt in Leitern Wärme. Stellen Sie sich ihre Entstehung in festen Leitern so vor, daß die Impulse, die von den dahinströmenden freien Elektronen ausgehen, auch die übrigen Elektronen zu Schwingungen anregen, die sich als Wärme äußern. Diese Wärmewirkung (ausgenutzt in

der Elektrowärmetechnik, z.B. bei der Kochplatte, beim Bügeleisen) wird genauer in den folgenden Lehrbriefen behandelt.

Zu 1.1.2.2. Magnetische Wirkung

Der elektrische Strom ist immer von einem Magnetfeld begleitet, das den Stromleiter räumlich umgibt. Deshalb ist es möglich, einen elektrischen Strom anschaulich mit einer Magnetnadel nachzuweisen, die durch einen stromdurchflossenen Leiter aus ihrer ursprünglichen Nord-Süd-Richtung gebracht wird (Bild 4).

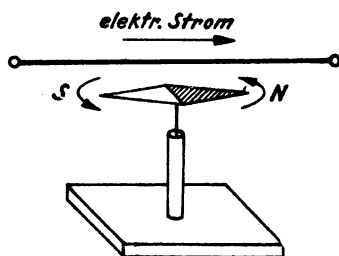


Bild 4: Magnetische Wirkung des Stromes

Zu 1.1.2.3. Chemische Wirkung

Es ist Ihnen bereits bekannt, daß der Stromfluß in einem Leiter II. Klasse immer mit einem nachweisbaren Materietransport verbunden ist. Sie können das beim Bleibaum-Versuch erkennen (Bild 5).

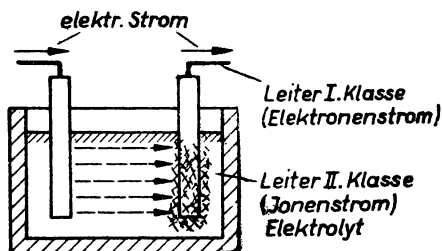


Bild 5: Chemische Wirkung des elektrischen Stromes

Sie füllen dazu ein geeignetes Gefäß mit einer wäßrigen Lösung von Bleiazetat $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ als Flüssigkeitsleiter (Leiter II. Klasse = Elektrolyt) und leiten durch diese Lösung mittels zweier Platten (Elektroden) aus Blei den elektrischen Strom. Es zeigen sich an den beiden Elektroden unterschiedliche Veränderungen. An einer Elektrode scheidet sich das Blei in prächtigen Kristallen ab, während die andere Platte ebensoviel Blei an die Lösung abgibt, was leicht durch Wägungen der beiden Elektroden zu beweisen ist. Die Gewichtsabnahme bzw. -zunahme der beiden Bleiplatten in dem elektrolytischen Bad ist die Folge der mit der Ionenladung dahinströmenden Materie.

Wir wollen uns also merken:

Bei Stromfluß im elektrolytischen Bad erfolgt ein Stofftransport.

Auf die Wirkungen des elektrischen Stromes werden wir in den folgenden Ausführungen noch öfter zurückgreifen. Merken Sie sich deshalb diese Wirkungen gut.

1.1.3. Elektrizitätsmenge, Stromstärke, Stromdichte, Einheiten

Um die Wirkungen des elektrischen Stromes untersuchen zu können, ist es notwendig, für alle vorkommenden Größen bestimmte Maße einzuführen. Wie Sie sich vorstellen können, sind die Wirkungen des elektrischen Stromes um so stärker, je größer die Elektrizitätsmenge ist, die während einer zu wählenden Zeitspanne im Leiter fließt. Die Stärke des Stromes steigt, wenn im gewählten Zeitintervall viele Ladungsträger fließen. Die Stärke des Stromes ist kleiner, wenn unter gleichen Bedingungen wenig Elektrizitätsmengen wandern. Die Größe der Elektrizitätsmenge, bezogen auf eine bestimmte Zeitspanne, ist also bestimmend für die Stärke des Stromes.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich für die Stromstärke folgende Definition:

Die Stromstärke ist gleich dem Quotienten aus Elektrizitäts-

tätsmenge und Strömungsdauer, betrachtet an einer bestimmten Querschnittsstelle des Leiters.

Stromstärke = $\frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Strömungsdauer}}$ oder

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

Definition der Stromstärke. (1)

Die Formelzeichen der einzelnen Größen können Sie sich am besten wie folgt merken:

Für die Stromstärke wurde der Buchstabe I gewählt. Man kann ihn erklären, wenn man nicht von der Stromstärke, sondern von der Intensität der Strömung spricht.

Statt (Elektrizitäts-)Menge können wir auch (Elektrizitäts-) Quantität sagen; daher das Formelzeichen Q für die Elektrizitätsmenge.

Das Formelzeichen t ist Ihnen bestimmt aus der Physik bekannt.

Ebenso wie in der Physik oder in anderen naturwissenschaftlichen oder technischen Disziplinen hat man auch in der Elektrotechnik Bezugsgrößen eingeführt, die man Einheiten nennt. Man benötigt diese Einheiten, um bestimmte Größen mengemäßig miteinander vergleichen zu können.

So kennen Sie z.B. aus der Physik die Einheit der Masse, das Kilogramm (kg), und die Einheit der Zeit, die Sekunde (s). Analog dazu sind auch in der Elektrotechnik Einheiten für die elektrischen Größen festgelegt worden, die sich mit einfachen Mitteln rekonstruieren lassen.

Wenden wir uns der Einheit der Stromstärke zu. Dazu sehen Sie sich nochmals an, wie die Definition der Stromstärke lautet:

Verhältnis aus der in einer bestimmten Zeit durch einen Leiterquerschnitt strömenden Elektrizitätsmenge zur Dauer des Strömens.

Die Einheit der Stromstärke ist nun nicht auf der Grundlage der Definition der Stromstärke festgelegt worden. Die Grund-

lage der Stromstärkeeinheit ist eine der Wirkungen des elektrischen Stromes, nämlich die magnetische Wirkung. Ihnen ist vielleicht aus Ihrer Grundschulzeit die auf der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes beruhende Festlegung der Einheit der Stromstärke bekannt. Diese ist jedoch veraltet und gilt nicht mehr. Mit der Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten vom 14.8.1958 wurde in der DDR die Empfehlung der X. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (Paris 1954) verwirklicht. Danach lautet die Einheit der Stromstärke, das Ampere, Kurzzeichen A (André Marie Ampere, französischer Physiker, 1775 - 1836), wie folgt:

Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die einen Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2}$ beträgt.

Diese Festlegung können Sie vorläufig noch nicht verstehen. Kommen Sie deshalb nach dem Studium des Lehrbriefes über Magnetismus nochmals darauf zurück.

Vereinfachungen beim Rechnen bringen die Untereinheiten der Stromstärke mit sich, denn es ist nicht zweckmäßig, mit sehr großen bzw. sehr kleinen Zahlen zu rechnen. Solche vom Ampere abgeleitete Einheiten sind:

1 Mikroampere (μA)	= 0,000001 A	= 10^{-6}A
1 Milliampere (mA)	= 0,001 A	= 10^{-3}A
1 Kiloampere (kA)	= 1000 A	= 10^3A
1 Megaampere (MA)	= 1000000 A	= 10^6A

Größenvorstellungen

Damit Sie sich einen Begriff über die Größe des elektrischen Stromes, der in den einzelnen elektrischen Apparaten fließt,

machen können, geben wir Ihnen einige Vergleichsgrößen:

Strom in einem Fernsprecher	einige μA
Anodenstrom der Radoröhre	einige mA
Strom in den Glühlampen der Haushalte	einige 100 mA
Strom in einer Kochplatte	etwa 5 A
Strom beim elektrischen Schweißen	einige 100 A
Strom im Elektrostrahlofen	einige kA

Die Einheit der Elektrizitätsmenge

Den Begriff der Elektrizitätsmenge führten wir bei der Behandlung der Definitionsgleichung der Stromstärke ein. Diese Definitionsgleichung wollen wir auch dazu benutzen, die Einheit der Elektrizitätsmenge abzuleiten.

Die Definitionsgleichung der Stromstärke lautet:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Strömungsdauer}} \quad \text{oder}$$

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

Nach der Elektrizitätsmenge aufgelöst, ergibt das:

$$\boxed{Q = I \cdot t} \quad (2)$$

Setzen wir statt der Größen die Einheiten in die Gleichung ein (für die Stromstärke I die Einheit A -Ampere- und für die Zeit t die Einheit s -Sekunden-), erhalten wir als die Einheit der Elektrizitätsmenge: As = Amperesekunden.

$$[Q] = [I \cdot t] = \text{A} \cdot \text{s} = \text{As}$$

1 As = 1 Amperesekunde wird auch als 1 C = 1 Coulomb bezeichnet.

Eine Amperesekunde (1 As) ist die Elektrizitätsmenge, die bei einer Stromstärke von einem Ampere (1 A) während einer Sekunde (1 s) durch den Querschnitt eines Leiters fließt.

Zur Rechnungsvereinfachung ist folgende Untereinheit der Elektrizitätsmenge festgelegt worden:

$$1 \text{ Amperestunde} = 1 \text{ Ah} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ As}$$

Für die Fortleitung des Stromes ist noch die Größe der Stromdichte S wichtig, die die Beziehungen zwischen der Stromstärke I und dem Querschnitt A eines Leiters charakterisiert. Die Stromdichte ist proportional dem im Leiter fließenden Strom und umgekehrt proportional dem Leiterquerschnitt (Bild 6).

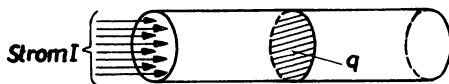


Bild 6: Stromdichte

Definition der Stromdichte:

$$\text{Stromdichte} = \frac{\text{Stromstärke}}{\text{Leiterquerschnitt}} \quad \text{oder}$$

$$\boxed{S = \frac{I}{A}} \quad \text{Definitionsgleichung.} \quad (3)$$

Die Einheit der Stromdichte

Die Einheit der Stromdichte ist ebenfalls wie die Einheit der Stromstärke bzw. der Elektrizitätsmenge aus ihrer Definitionsgleichung abzuleiten:

$$\text{Stromdichte} = \frac{\text{Stromstärke}}{\text{Leiterquerschnitt}}$$

Setzt man, wie bei der Gleichung der Elektrizitätsmenge, die Einheiten ein (Stromstärke I in Ampere -A-, Leiterquerschnitt A in mm^2), dann erhält man die Einheit der Stromdichte S in A/mm^2 .

$$[S] = \left[\frac{I}{A} \right] = \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

1.1.4. Messung der Stromstärke, Schaltung des Strommessers

Sie haben sich in den vorhergehenden Abschnitten mit der Definition und der Einheit der Stromstärke beschäftigt und lernten die Wirkungen des elektrischen Stromes kennen. Die Größe der Wirkungen ist in jedem Falle abhängig von der Stromstärke. Will man beispielsweise in einem elektrischen Wärmegerät eine ganz bestimmte Wärmewirkung erzielen, so muß man u.a. wissen, wie groß die Stromstärke sein muß. Es ist also wichtig, die Stromstärke für elektrische Maschinen und Apparate zu messen. In den Meßgeräten werden die Wirkungen des elektrischen Stromes ausgenutzt, die um so stärker sind, je größer die Stromstärke ist.

Man kann daher die Strommesser in drei Gruppen einteilen:

- 1.1.4.1. Strommesser, die auf der chemischen Wirkung beruhen;
- 1.1.4.2. Strommesser, die auf der Wärmewirkung beruhen;
- 1.1.4.3. Strommesser, die auf der magnetischen Wirkung beruhen.

Zu 1.1.4.1. Strommesser, die auf der chemischen Wirkung beruhen

Dieser Strommesser ist dem Schema nach nichts anderes als ein elektrolytisches Bad, in dem man den Stoff, der durch den fließenden Strom transportiert wird, als Äquivalent der Stromstärke betrachtet. Man kann dann die Stromstärke mittels einer Zeitmessung und einer Wägung bestimmen. Diese Strommesser haben für die Praxis aber keine Bedeutung und sollen der Vollständigkeit halber hier nur erwähnt werden.

Zu 1.1.4.2. Strommesser, die auf der Wärmewirkung beruhen

Die Strommesser, die auf der Wärmewirkung beruhen, sind die Hitzdraht- und die Thermoinstrumente.

Die Hitzdrahtinstrumente beruhen ihrem Prinzip nach darauf, daß sich ein Draht beim Erwärmen ausdehnt. Dabei ist die Erwärmung infolge des durchfließenden Stromes um so stärker, je größer der Stromfluß ist. Des Ausdehnen des Drahtes wird

auf einen Zeiger übertragen, dessen Ausschlag proportional mit dem Quadrat der Stromstärke wächst (Bild 7).

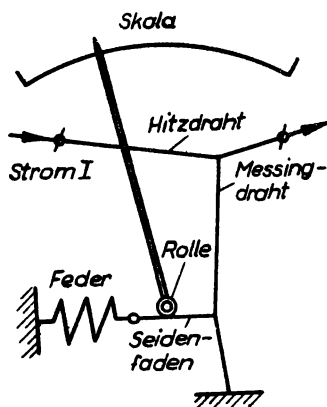


Bild 7: Hitzdrahtinstrument

Diese Instrumente haben für die Praxis jedoch sehr an Bedeutung verloren, weil sie einen hohen Eigenverbrauch haben und sehr von äußeren Einflüssen abhängig sind.

Die Thermoinstrumente finden vor allem in der Hochfrequenztechnik Anwendung. Sie beruhen ebenfalls auf dem Prinzip, daß sich ein stromdurchflossener Leiter erwärmt. Die Erwärmung wird auf ein Thermoelement - als Spannungsquelle - übertragen und der Strom dann gemessen. Man wendet diese Instrumente meist nur im Labor an (Das Thermoelement lernen Sie näher unter 1.2.3. kennen).

Zu 1.1.4.3. Strommesser, die auf der magnetischen Wirkung beruhen

Bei den Dreheisen- und Drehspulinstrumenten nutzt man die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes aus.

Die Wirkungsweise der Dreheiseninstrumente beruht darauf, daß der Strom eine Elektromagnetspule durchfließt, in die je nach

Stromstärke ein leichtes Eisenblech mehr oder weniger hinein-gezogen wird. Dieses Eisenblech ist drehbar auf einer Achse angeordnet, die mit einem Zeiger verbunden ist. Als Gegengewicht gegen die Anziehung der Elektromagnetspule wirkt eine Feder, ähnlich der Unruhefeder einer Uhr. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß die Bewegung des Eisenbleches und damit des Zeigers proportional der Stromstärke erfolgt (Bild 8).

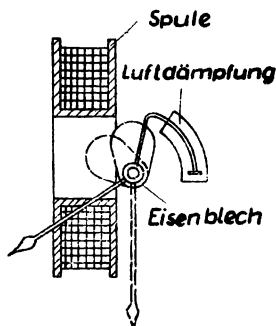


Bild 8: Dreheiseninstrument

Am genauesten zeigen die Drehspulinstrumente die Stromstärke an, die deshalb auch am meisten verbreitet sind. Das Prinzip des Drehspulinstruments beruht auf der Kraft, die auf eine stromdurchflossene Spule im Magnetfeld einwirkt. Diese Kraft haben Sie bereits bei der Erläuterung der Wirkungen des elektrischen Stromes kennengelernt. Sie sahen, daß eine Magnetnadel durch einen stromdurchflossenen Leiter aus ihrer ursprünglichen Nord-Süd-Richtung abgelenkt wurde. Ähnlich ist es auch bei dem Drehspulinstrument, nur daß hier der Dauermagnet fest und der stromdurchflossene Leiter als Drehspule drehbar angeordnet ist. Fließt durch die Drehspule ein Strom, dann wirkt auf die im Magnetfeld liegenden Spulenseiten eine Kraft, die der Stromstärke direkt proportional ist. Als Gegengewicht der Drehung der Spule sind bei den Drehspulinstrumenten zwei Federn eingebaut, die ihr auch den Strom zuleiten. Auf der Achse ist, ebenfalls wie bei den Dreheiseninstrumen-

ten, ein Zeiger angebracht, so daß man durch den Zeigeraus-
schlag die Stromstärke auf einer Skala ablesen kann. Dreh-
spulinstrumente können aber nur für Gleichstrommessungen ver-
wendet werden; in Verbindung mit einem Meßgleichrichter sind
sie jedoch auch für Wechselstrommessungen benutzbar (Bild 9).

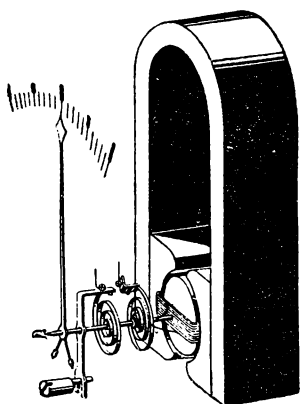


Bild 9: Drehspulinstrument

Da wir bei der Strommessung die fließenden Elektrizitätsmen-
gen in einem Stromkreis messen wollen, sind die Strommesser
so anzuordnen oder zu "schalten", daß der zu messende Strom
durch das Instrument hindurchfließen muß (Bild 10).

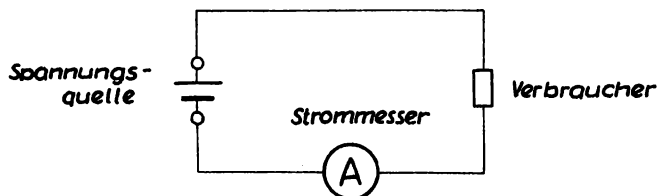


Bild 10: Schaltung von Strommessern

Man sagt auch, Strommesser werden in den Strompfad geschaltet. Weitere Einzelheiten und Zusammenhänge lernen Sie später kennen.

Zusammenfassung

Voraussetzung für die Fortleitung des elektrischen Stromes sind die freien Elektronen. Bei den Leitern I. Klasse (den Elektronenleitern) sind die Träger der dahinströmenden Elektrizitätsmengen die Elektronen, bei Leitern II. Klasse (den Ionenleitern) sind die Träger das gesamte "elektrisch geladene" Atom, das Ion.

Die wichtigsten Wirkungen des elektrischen Stromes sind:

die Wärmewirkung des elektrischen Stromes,
die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes,
die chemische Wirkung des elektrischen Stromes.

Die einzelnen Größen werden wie folgt definiert:

$$\text{Stromstärke } I = \frac{\text{Elektrizitätsmenge } Q}{\text{Strömungsdauer } t}$$

$$\text{Stromdichte } S = \frac{\text{Stromstärke } I}{\text{Leiterquerschnitt } A}$$

Die Einheit der Stromstärke I ist das Ampere = A.

Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist 1 Amperesekunde:

1 As = 1 Coulomb = 1 C (abgeleitet aus der Gleichung

$Q = I \cdot t$, As = A · s).

Die Stromstärke kann man mit Strommessern messen, die

1. auf chemischer Wirkung,
2. auf Wärmewirkung (Hitzdrahtinstrumente, Thermoinstrumente),
3. auf magnetischer Wirkung (Dreheisen- und Drehspulinstrumente)

beruhen.

Strommesser werden in den Strompfad geschaltet.

Wiederholungsfragen

1. Was ist der Unterschied zwischen Leitern I. und II. Klasse?
2. Welche Wirkung des elektrischen Stromes benutzt man neuerdings für die Festlegung der Einheit der Stromstärke?
3. Welche Einheiten der Elektrizitätsmenge kennen Sie?
4. Wie werden Strommesser geschaltet?
5. Was ist der Unterschied zwischen einem Dreheiseninstrument und einem Drehspulinstrument bei der Messung von Gleich- und Wechselstrom?

1.1.5. Die Gefahren des elektrischen Stromes

Bei unmittelbarer Berührung stromführender Teile können die Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper schädigend, ja sogar tödlich sein. Die Tatsache, daß der elektrische Strom als solcher für die menschlichen Sinnesorgane nicht wahrnehmbar ist, weil er unsichtbar, geruchlos, geschmacklos usw. ist, mahnt alle Menschen zu besonderer Vorsicht gegenüber elektrischen Anlagen und Geräten.

Gefahrenquellen entstehen vor allem durch Beschädigungen und unsachgemäße Installation von elektrischen Anlagen und Geräten. Daher ist niemand, außer den speziell elektrotechnisch ausgebildeten Fachkräften in Ihrem Betrieb, berechtigt, irgendwelche Veränderungen an vorhandenen Anlagen vorzunehmen oder neue zu verlegen. Die Verantwortlichen des Betriebes für den Arbeitsschutz haben die Aufgabe, hierüber streng zu wachen und die Werktätigen über die Gefahren aufzuklären. Wie macht sich der Einfluß des elektrischen Stromes bei entsprechender Dosis auf den menschlichen Körper bemerkbar?

Zu den äußeren Schädigungen gehören die Verbrennungen, die in verschiedenen hohen Graden auftreten können.

Gleichzeitig besteht die Gefahr innerer Schädigungen. Diese äußern sich, da der Strom von den Muskelsträngen geleitet wird, in Lähmungserscheinungen verschiedener Körperteile bzw.

Organe. So sind z.B. Störungen der Herzmuskelbewegungen möglich, die bis zum vollständigen Aussetzen dieser Bewegungen führen können. Ferner können eine Beeinträchtigung des Zentralnervensystems mit einer Gehirnlähmung sowie Verkrampfungen der Atmungsmuskulatur mit dem Erstickungstode enden. Ebenso handelt es sich um eine Lähmung der Handmuskeln, die von einer bestimmten Stärke des Stromes an ein Loslassen der stromdurchflossenen Teile verhindert.

Wo liegen die Grenzen von gefährdenden Stromstärken?

Hierzu kann man selbstverständlich keine absoluten Werte angeben, da verschiedene Faktoren eine Rolle spielen.

Erstens sind die Menschen verschieden empfindlich, zweitens kommt es auf die Bahn an, die der Strom durch den Körper nimmt. Ferner ist der Übergangswiderstand von der Elektrode zum Körper von Bedeutung. Dieser wiederum ist kleiner bei hoher Hautfeuchtigkeit und hohem Berührungsdruck.

Wegen dieser vielfältigen Faktoren, die alle eine Rolle spielen, lassen sich hierzu Werte nur in gewissen Grenzen angeben. So sind für den Stromdurchgang beim Menschen 20 mA als höchstzulässig, 50 mA als bereits gefährlich und 100 mA als sicher tödlich anzusehen. Vermerkt sei noch, daß Tiere allgemein empfindlicher gegenüber elektrischen Strömen sind als Menschen.

Weitere Einzelheiten, insbesondere über Schutzmaßnahmen, finden Sie in den VDE-Vorschriften VDE 0100, 0101, 0140 und 0141.

1.2. Spannung

1.2.1. Vom Wesen der Spannung

Wir haben im vorigen Abschnitt vorausgesetzt, daß ein Strom fließt, und nur die Bedingungen untersucht, unter denen ein Stromfluß möglich ist. In diesem Abschnitt wollen wir uns näher mit der Ursache des Stromflusses beschäftigen.

Eine elektrische Spannung kann immer nur zwischen zwei Punkten oder Polen bestehen. Die beiden Pole unterscheiden sich

dadurch, daß auf dem einen mehr Elektronen konzentriert sind als auf dem anderen. Entsprechend der negativen Ladung der Elektronen bezeichnet man den Pol mit der größeren Elektronenkonzentration als negativen Pol oder Katode. Den Pol, an dem ein Elektronenmangel herrscht, bezeichnet man als positiven Pol oder Anode.

Da gleichnamige Ladungen einander abstoßen, jedoch nirgendshin ausweichen können, kommt es auf den Polen zu einem Elektronendruck.

An der Katode (Elektronenkonzentration) herrscht also ein Elektronenüberdruck und an der Anode (Elektronenmangel) demgegenüber ein Elektronenunterdruck. Der Unterschied zwischen den beiden Polen besteht somit in dem unterschiedlichen Elektronendruck. Oder anders ausgedrückt: Zwischen beiden Polen besteht ein Elektronendruckunterschied. Dieser Elektronendruckunterschied ist die Spannung.

1.2.2. Urspannung und Spannungsabfall

Wir müssen bei der Behandlung der Spannung zwei Formen unterscheiden: Die Urspannung und den Spannungsabfall.

Urspannung wird in sogenannten Spannungsquellen (z.B. Taschenlampenbatterie, Fahrraddynamo, Turbogenerator usw.) erzeugt. Das geschieht dadurch, daß durch bestimmte Prozesse in der Spannungsquelle ein Elektronendruckunterschied zwischen den beiden Polen geschaffen wird (Elektronenüberschuß am negativen und Elektronenmangel am positiven Pol). Dieser Gegensatz birgt gleichzeitig den Drang zum Ausgleich in sich, der, wenn die Bedingungen gegeben sind, erfolgen kann. Hier haben Sie eine Bestätigung des Satzes aus dem dialektischen Materialismus, wonach alle Widersprüche zur Lösung drängen.

Die Bedingungen zum Ausgleich sind gegeben, wenn beispielsweise die beiden Anschlußleitungen eines elektrischen Gerätes mit je einem Pol der Spannungsquelle verbunden werden. Jetzt bewirkt der Elektronendruckunterschied zwischen den beiden Polen einen Antrieb der im Leiter befindlichen freien Elektronen. Vom negativen Pol werden die Elektronen in den Leiter

hineingepreßt, während gleichzeitig der positive Pol die Elektronen aus dem Leiter herausaugt (Impulswirkung des elektrischen Stromes). Der Strom, als gerichtete Bewegung der Elektronen, ist somit die natürliche Folge des Ausgleichsbestrebens der Urspannung.

Merken Sie sich:

Die Urspannung ist die Ursache für das Geschehen in den an die Spannungsquelle angeschlossenen Leitungen und Geräten.

Die Urspannung bezeichnet man mit dem Formelzeichen E .

Spannungsabfall

Der Spannungsabfall wird mit dem Formelzeichen U bezeichnet. Wie Sie im vorhergehenden Abschnitt gesehen haben, liegt der Ursprung des Bewegungsdranges (Antriebsenergie) der Ladungsträger (die Urspannung) in der Spannungsquelle. Die Ladungsträger bewegen sich in dem Leiter und werden in ihm mehr oder weniger gebremst. Durch dieses Bremsen verlieren die Ladungsträger Bewegungsenergie. Die Bewegungsenergie (Urspannung), die die Ladungsträger in der Spannungsquelle erhalten, vermindert sich, da die Ladungsträger bei ihrer Wanderung im Leiter abgebremst werden. Kommen die Ladungsträger nach ihrer Wanderung durch den Leiter zur Spannungsquelle wieder zurück, ist ihre Bewegungsenergie an der Klemme der Spannungsquelle völlig aufgehoben.

Um einen bildlichen Vergleich zu verwenden: Wir betrachten die Spannungsquelle als eine Pumpe, die die Elektronen in den Leiter hineindrückt. Der Leiter, in dem sich die Elektronen bewegen, hat einen Reibungswiderstand, so daß die Bewegungsenergie, die die Elektronen durch die Pumpe (Urspannung) erhalten haben, am Ende der Leitung (unmittelbar vor der Spannungsquelle) durch den Reibungswiderstand vollkommen aufgebraucht ist. Die Differenz der Bewegungsenergie, die zwischen zwei Punkten des Leiters (bedingt durch den Reibungswiderstand) auftritt, bezeichnen wir als Spannungsabfall zwischen diesen beiden Punkten.

Aus der Tatsache, daß die Bewegungsenergie der Ladungsträger nach einem Umlauf durch den geschlossenen Leiterkreis restlos aufgebraucht ist, läßt sich schlußfolgern: Im geschlossenen Leiterkreis ist die Antriebsenergie gleich dem Verbrauch der Antriebsenergie. Durch die beiden Spannungsformen ausgedrückt:

- Urspannung und Spannungsabfall sind in einem geschlossenen Leiterkreis gleich groß.

Da man sich die Gesamturspannung und den Gesamtspannungsabfall aus Teilen dieser Größen zusammengesetzt denken kann, gilt allgemein:

In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle.

Sie können sich also merken:

$$\boxed{\sum E = \sum U} \quad (4)$$

Als Spannungsabfall bezeichnet man den Verlust an Bewegungsenergie, den die Ladungsträger zwischen zwei Punkten in einem geschlossenen Stromkreis erleiden.

An dieser Stelle wollen wir uns noch mit der Stromrichtung befassen. Aus den Erläuterungen zum Wesen der Spannung ist die Richtung des elektrischen Stromes eindeutig zu bestimmen. Sie verläuft von der Katode (Elektronenüberdruck) durch den Leiter zur Anode (Elektronenmangel) und von da durch die Spannungsquelle zur Katode.

Richtung des Elektronenstromes: außerhalb der Spannungsquelle: von der Katode zur Anode
in der Spannungsquelle: von der Anode zur Katode

Die Stromrichtung wurde jedoch festgelegt, bevor man Kenntnis von den wirklichen Zusammenhängen und dem Verhalten der freien Elektronen hatte. Die Stromrichtung wurde abgeleitet aus dem bereits geschilderten Verhalten von Flüssigkeitsleitern (Leitern II. Klasse) bei Stromdurchfluß. Im Abschnitt

1.1.2.3. haben Sie gesehen, daß bei Stromfluß im elektrolytischen Bad ein Stofftransport erfolgt. Dabei ist an der Elektrode, die mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbunden ist (Anode), eine Gewichtsabnahme zu verzeichnen und an der mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundenen Elektrode (Katode) eine Gewichtszunahme. Aus dieser Erkenntnis wurde die dem Elektronenstrom entgegengesetzte Stromrichtung abgeleitet. Man hat diese Annahme der Stromrichtung in der Technik beibehalten, weil viele Regeln - besonders beim Magnetismus - auf dieser Stromrichtung aufgebaut sind. Man bezeichnet diese angenommene Stromrichtung als technische Stromrichtung.

Technische Stromrichtung:

außerhalb der Spannungsquelle: von der Anode zur Katode

in der Spannungsquelle: von der Katode zur Anode

1.2.3. Die wichtigsten Erzeugungsarten der Urspannung

Wir wollen uns bei den Spannungsquellen nur auf eine grundsätzliche Betrachtung der Vorgänge beschränken; eine ausführliche Behandlung erfolgt später.

Urspannungserzeugung durch Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie

Die typischen Vertreter unter den Erzeugern von Urspannung durch chemische Prozesse sind die galvanischen Elemente, die ältesten gebräuchlichen Spannungsquellen, und der Akkumulator. Die Erzeugung von Urspannung in diesen galvanischen Spannungsquellen kann wie folgt schematisch dargestellt werden: Taucht man einen festen Leiter, z.B. Zink, in eine Flüssigkeit mit Ionen (Elektrolyten), im speziellen Fall verdünnte Schwefelsäure, so bilden sich an der Grenzfläche fester Leiter-Elektrolyt Ionen, die das Bestreben haben, in den Elektrolyten zu wandern. Andererseits versucht der Elektrolyt ebenfalls, seine Ionen in den Leiter zu pressen. Es läßt sich daher ein resultierender Bewegungsdrang auf die Ladungsträger an der Grenzfläche von Leiter I. Klasse zu Leiter II. Klasse ermit-

teilen (Bild 11). Dieser Bewegungsdrang ist die galvanische Urspannung.

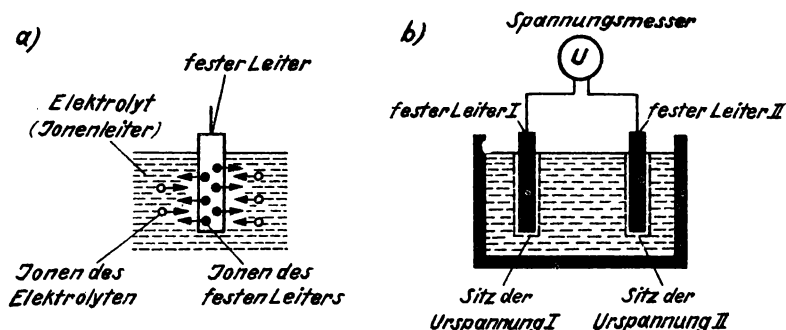


Bild 11: Galvanische Urspannungserzeugung

Um sie von außen nützen zu können, ist es notwendig, einen zweiten festen Leiter in den Elektrolyten zu tauchen. An dessen Grenzfläche mit dem Elektrolyten kommt es gleichfalls zu einem Bewegungsdrang der Ionen und damit zu einer Urspannung. Damit sich die Bewegungsenergien der beiden Leiter nicht aufheben, müssen sie aus verschiedenem Material bestehen (in unserem Beispiel aus Zink und Kupfer). Die Differenz der Bewegungsenergien an den Grenzflächen beider fester Leiter (Zink und Kupfer) und dem Flüssigkeitsleiter (verdünnte Schwefelsäure) ist die nach außen wirksame Urspannung.

Urspannungserzeugung durch Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie

Die Urspannungserzeugung durch Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie wird im Thermoelement ausgenutzt. Es dient zu Temperaturmessungen in Industrieöfen u.dgl. Außerdem verwendet man Thermoelemente in der Messtechnik bei der Messung von hochfrequenten Strömen. Der Vorgang der Erzeugung der Urspannung ist ähnlich dem im galvanischen Element, nur daß hier nicht ein fester Leiter mit einem Elektrolyten zusammen-

stößt, sondern zwei verschiedene Metalle oder Metallegierungen. Es stoßen hier nicht - wie im galvanischen Element - die Ionen aufeinander, sondern die Elektronen der beiden festen Leiter. Wie Sie bereits wissen, ist es möglich, die freien Elektronen (die Elektronen auf der äußeren Schale) unter anderem durch Wärme aus ihrer Bahn zu bringen; das wird praktisch im Thermoelement ausgenutzt. Man erwärmt hierzu die Verbindungsstelle (Lötung) der beiden verschiedenen Metalle (z.B. Kupfer und Konstantan). Die Elektronen haben durch die Energiezufuhr das Bestreben, sich in das Gefüge des anderen festen Leiters hineinzudrücken. Da es sich nicht um zwei gleiche Metalle handelt, ist auch der Druck der Elektronen des einen festen Leiters auf den anderen unterschiedlich. Dieser Druck und damit der Bewegungsdrang der Elektronen ist die Ursache für das Entstehen der Urspannung.

Es ist hier ähnlich wie bei dem galvanischen Element: Dort, wo zwei feste Leiter einander berühren (bei der chemischen Ursprungserzeugung durch das Berühren von einem festen und einem Flüssigkeitsleiter) ist zwar die Bedingung für das Entstehen der Urspannung an der Stoßstelle gegeben, ein Strom kann aber erst bei geschlossenem Stromkreis fließen. Schließt man den Stromkreis durch Verbindung der Enden der beiden Metalle a und b (Bild 12), so entsteht eine zweite Urspannung, die der ersten entgegenwirkt. Ein Stromfluß kann in diesem Stromkreis nur zustande kommen, wenn Urspannung 1 nicht gleich Urspannung 2 ist. Dies ist gegeben, wenn an den beiden Urspannungsstellen unterschiedliche Bedingungen (Temperaturen) herrschen. Der durch die Differenzurspannung = Thermourspannung angetriebene Strom bringt den Zeigerausschlag eines eingeschalteten Strommessers hervor. Richt man diesen Strommesser in Temperatureinheiten, so läßt sich an der dementsprechend ausgeführten Skala unmittelbar die Temperatur an der Meßstelle ablesen.

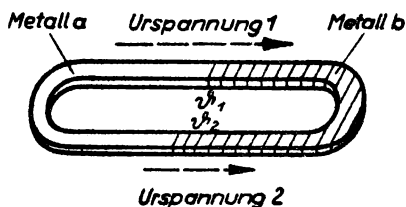


Bild 12: Thermourspannung

Urspannungserzeugung durch Schneiden von Kraftlinien eines Magnetfeldes (Induktion)

Diese Art der Erzeugung der Urspannung ist die wichtigste von den hier aufgezählten; denn sie ist technisch von größter Bedeutung. Mit Hilfe dieser Art der Urspannungserzeugung kann man Spannungsquellen schaffen, durch die es möglich ist, mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand hohe Spannungen bei großem Stromfluß zu erzeugen; z.B. in den Generatoren unserer Kraftwerke.

Wie Ihnen bereits bekannt ist, kann man durch Magnetismus einen Bewegungsdrang auf die Elektronen in einem Leiter ausüben. Bewegt man einen festen Leiter in einem Magnetfeld bzw. wird ein Magnetfeld, in dem sich ein Leiter befindet, so bewegt, daß Kraftlinien vom festen Leiter geschnitten werden, dann kreisen die freien Elektronen - also die Ladungsträger - nicht mehr auf ihrer ursprünglichen Bahn, sondern üben einen Bewegungsdrang auf die Elektronen der benachbarten Atome aus. Dieser Bewegungsdrang ist, wie Sie aus den vorhergehenden Abschnitten wissen, gleichzusetzen mit der Urspannung (Bild 13).

Stellen Sie sich folgenden Versuch vor, der meist beim Unterricht an dieser Stelle vorgeführt wird:

An die beiden Enden einer Spule mit mehreren tausend Windungen aus isoliertem Kupferdraht wird ein empfindlicher Spannungsmesser geschaltet. Nun steckt man einen Magnetstab in

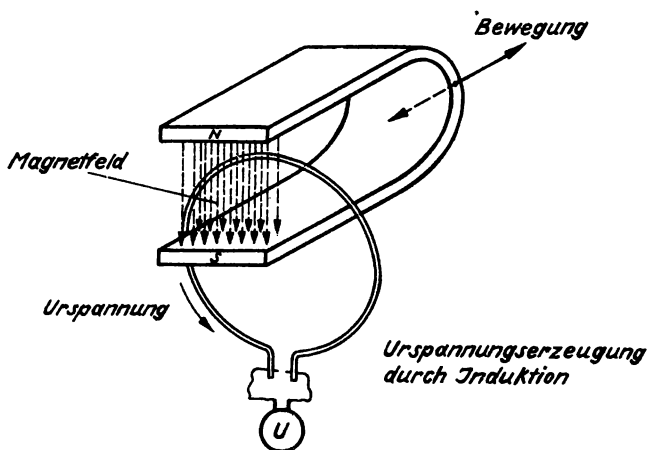


Bild 13: Urspannungserzeugung durch Induktion

das Innere der Spule und bewegt ihn hin und her. Durch dieses Hin- und Herbewegen schneiden die einzelnen Drähte der Spule die Kraftlinien. Dadurch erhalten Ladungsträger in der Spule einen Bewegungsdrang, es wird also eine Urspannung induziert. Wenn man den empfindlichen Spannungsmesser dieser Schaltung betrachtet, sieht man auch bei jedem Auf- und Abbewegen des Magnetstabes ganz deutlich einen Ausschlag des Instruments - der Beweis der Erzeugung einer Urspannung. Bei stillstehendem Magnet werden keine Kraftlinien geschnitten, demnach auch keine Urspannung erzeugt, das Instrument schlägt nicht aus. Den Vorgang der Urspannungserzeugung im Leiter durch das Schneiden von Kraftlinien nennt man Induktion (Bild 14).

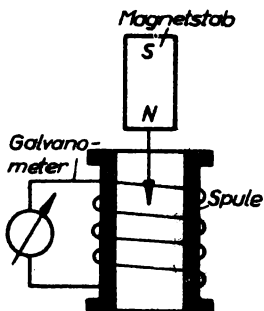


Bild 14: Versuchsaufbau Induktionswirkung

1.2.4. Wirkungen der Spannung

Bei der Behandlung der Wirkungen des Stromes haben wir festgestellt, daß wir einen Stromfluß mit unseren Sinnesorganen nicht direkt wahrnehmen können. Wie verhält es sich mit den Wirkungen der Spannung? Können wir eine Spannung schmecken, riechen oder sehen?

Nein, das können wir nicht. Um eine Spannung nachzuweisen, sind wir daher, ebenso wie beim Strom, gezwungen, dies an ihren Wirkungen zu tun. Dazu haben wir zwei Möglichkeiten.

- a) Die erste ist Ihnen bestimmt bekannt, und Sie haben sie auch schon angewendet. Was tun Sie, um festzustellen, ob die Steckdose in Ihrer Wohnung unter Spannung steht? Sie nehmen ein elektrisches Gerät mit einer Anschlußschnur (Tischlampe, Radio, Staubsauger usw.) und stecken den Stecker in die Steckdose. Leuchtet z.B. die Tischlampe auf, dann liegt an der Steckdose eine Spannung an, es fließt ein Strom.

Würde (vorausgesetzt, daß Lampe und Anschlußschnur in Ordnung sind) die Tischlampe aber nicht aufleuchten, dann flösse kein Strom, demnach läge an der Steckdose keine Spannung. Wir sehen also, daß Stromfluß nur bei Vorhandensein einer Spannung möglich ist. Ihnen ist bekannt, daß die Spannung die Ursache für den Strom ist; die Spannung

treibt den Strom an. Es ist unmöglich, daß ein Strom ohne eine Spannung auftritt, eine Wirkung der Spannung ist der Stromantrieb. Mittels der Wirkungen des Stromes ist daher auch eine Spannung nachzuweisen. Die wichtigsten Wirkungen eines Stromes, die Sie bereits im Abschnitt 1.1.2. kennenlernten, sind:

die Wärmewirkung des elektrischen Stromes,
die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes,
die chemische Wirkung des elektrischen Stromes.

- b) Eine andere Möglichkeit, eine Spannung nachzuweisen, besteht darin, daß man die Kraftwirkung der Spannung ausnützt. Diese Möglichkeit wird aber nicht so häufig angewendet wie der Stromantrieb. Die Kraftwirkung einer Spannung findet darin ihren Ausdruck, daß zwei unter Spannung stehende Leiter einander anziehen. Sie entsteht durch die Anziehungskraft gegensätzlicher Ladungen nach dem Coulombschen Gesetz. Dieses Gesetz werden Sie im Prinzip beim elektrischen Feld kennenlernen. Zur Erläuterung dieser Feststellung soll folgender Versuch dienen:

Man hängt zwei Aluminiumfolien gegeneinander isoliert und leicht beweglich auf, wie Sie aus dem Bild 15 ersehen

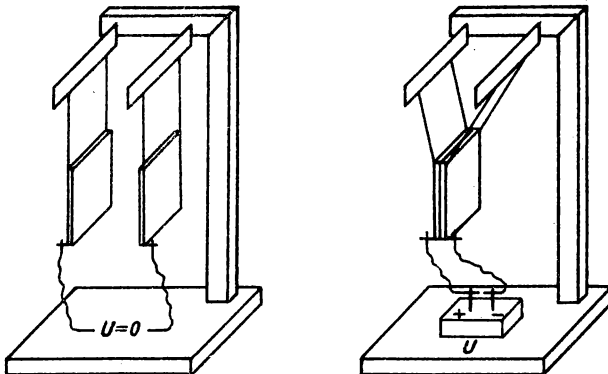


Bild 15: Kraftwirkung zwischen zwei spannungsführenden Metallplatten

können. Liegt an beiden Folien keine Spannung, hängen sie völlig ruhig nach unten. Wird dagegen eine Spannung angelegt, ziehen sie einander an.

Dieses Kennzeichen der Spannung, die Kraftwirkung, wird vor allem bei der stromlosen Spannungsmessung angewendet.

Zusammenfassend können wir uns also merken:

Es wird zwischen zwei Wirkungen der Spannung unterschieden:

- a) dem Stromantrieb. Durch diese Wirkung ist es möglich, eine Spannung mit den drei Wirkungen (chemische Wirkung, Wärmewirkung und magnetische Wirkung) des Stromes nachzuweisen,
- b) der Kraftwirkung einer Spannung.

1.2.5. Einheit der Spannung

Die Einheit der Spannung ist das Volt (benannt zu Ehren von Alexxander Volta, italienischer Physiker, 1745 - 1827). Abkürzungsbuchstabe für die Einheit der Spannung ist das V. Die Definition der Einheit der Spannung lautet:

Das Volt ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W umgesetzt wird.

Diese Definition müssen Sie zunächst hinnehmen, da Ihnen die Leistung und deren Einheit noch unbekannt sind.

Diese Definition in der mathematischen Ausdrucksweise dargestellt, lautet

$$\begin{aligned} 1 \text{ Volt} &= 1 \frac{\text{Watt}}{\text{Ampere}} \\ 1 \text{ V} &= 1 \frac{\text{W}}{\text{A}} \end{aligned}$$

Um bei Berechnungen sehr große bzw. sehr kleine Zahlenwerte

zu vermeiden, sind folgende Untereinheiten festgelegt worden:

$$\begin{aligned} 10^{-6}\text{V} &= 1 \mu\text{V} \quad (\text{Mikrovolt}) \\ 10^{-3}\text{V} &= 1 \text{ mV} \quad (\text{Millivolt}) \\ 10^3\text{V} &= 1 \text{ kV} \quad (\text{Kilovolt}) \\ 10^6\text{V} &= 1 \text{ MV} \quad (\text{Megavolt}) \end{aligned}$$

Damit Sie sich eine Vorstellung über die in den einzelnen elektrischen Geräten vorkommenden Spannungen machen können, geben wir Ihnen einige Beispiele:

Rundfunk- und Fernsehhempfangsspannungen	einige μV
Spannung eines Thermoelements	einige mV
Spannung einer Zelle eines Akkumulators	1,2 ... 2 V
Spannung für Lichtnetz	220 V
Spannung von Hochspannungsleitungen	20 ... 380 kV

1.2.6. Messung der Spannung, Schaltung des Spannungsmessers

Sie haben in dem Abschnitt 1.2.2. über die zwei Spannungsformen den Unterschied zwischen der Ursprungsspannung und dem Spannungsabfall kennengelernt. Mit dem Spannungsmeßinstrument mißt man den Spannungsabfall. Zur Spannungsmessung nutzt man die Wirkungen der Spannung aus:

- die Kraftwirkung der Spannung,
- den Stromantrieb der Spannung.

a) Spannungsmeßinstrumente, die auf der Kraftwirkung der Spannung beruhen

Das einfachste Instrument ist das schon viele Jahrhunderte bekannte Elektroskop nach Bild 16.

An einem Metallstab hängen zwei sehr dünne Aluminium- oder Goldblättchen. Wird dieser Stab mit dem Minus- oder Pluspol einer Spannungsquelle verbunden, dann

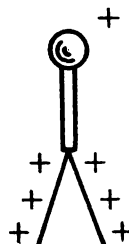


Bild 16:
Elektroskop

teilt sich dessen Ladung auch den beiden Metallblättchen mit, die einander, wie Sie bereits bei dem Versuch über die Kraftwirkung der Spannung gesehen haben, abstoßen und damit auseinanderspreizen. Diese Art des Nachweises einer Spannung ist nur bei sehr hohen Spannungen, z.B. in Hochspannungsanlagen, möglich. Sie werden vielfach in diesen Anlagen als Nachweis für spannungsführende Leitungen verwendet. Man hängt dazu meist einen Aluminiumstreifen über die Leitung. Hängen beide Enden kraftlos, steht die Leitung nicht unter Spannung, spreizen sich dagegen die beiden Enden dieses Aluminiumstreifens, dann liegt eine Spannung an.

Eine praktische Bedeutung für Spannungsmessung hat das Elektroskop jedoch nicht. Ähnlich verhält es sich auch mit den anderen beiden Systemen der Spannungsmessung, die auf der Kraftwirkung der Spannung beruhen: mit dem Fadenelektrometer und dem Vielkammer- oder Multizellular-Voltmeter. Wegen der einseitigen Anwendbarkeit der auf der Kraftwirkung der Spannung beruhenden Spannungsmessung findet man die elektrostatischen Meßinstrumente fast ausschließlich in Labors.

Man benützt aus diesem Grunde vorwiegend die zweite Wirkung der Spannung, den Stromantrieb, um die Spannung zu messen.

b) Spannungsmesser, die auf dem Stromantrieb der Spannung beruhen

Diese Spannungsmesser sind nichts anderes als in Spannung geeichte Strommesser. Es können daher alle Strommesser, die im Abschnitt 1.1.4. Messung der Stromstärke erläutert wurden, als Spannungsmesser Verwendung finden; gebräuchlich sind vor allem Dreheisen- und Drehspulinstrumente. Spannungsmesser, die auf dem Stromantrieb der Spannung beruhen, heißen auch "stromverbrauchende Spannungsmesser", weil der Stromfluß durch sie das Wesentliche ist im Gegen-

satz zu elektrostatischen Spannungsmessern, durch die annähernd kein Strom fließt und die man deshalb auch als "nichtstromverbrauchende Spannungsmesser" bezeichnet. Da man mit dem Spannungsmesser stets den Spannungsabfall mißt, sind die beiden Anschlußleitungen dieses Instrumentes an die beiden Endpunkte der Spannungsabfallstrecke anzuschließen. Die dabei entstehende Schaltung, die Sie noch kennenlernen werden, heißt Parallelschaltung (Bild 17). Sie merken sich daher:

Spannungsmesser sind parallel zur Spannungsabfallstrecke zu schalten.

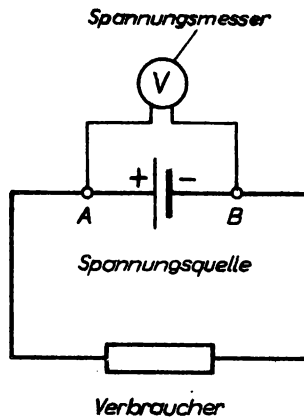


Bild 17: Schaltung von Spannungsmessern

Zusammenfassung

Die Voraussetzung für den Stromfluß ist das Vorhandensein einer Spannung. Wir unterscheiden bei der Spannung zwei Formen:

Die Ursache für den Bewegungsdrang auf Ladungsträger ist die Ursprungsspannung, die in der Spannungsquelle durch Umwandlung von Energie entsteht. Die zweite Form der Spannung ist der Spannungsabfall, der das Abbremsen der Bewegungsenergie der

einzelnen Ladungsträger im Leiterkreis charakterisiert.

Urspannung kann wie folgt erzeugt werden:

- a) durch Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie (galvanische Elemente, Akkumulatoren),
- b) durch Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie (Thermoelement),
- c) durch Schneiden von Kraftlinien (Induktion, Anwendung bei Generatoren).

Man unterscheidet zwischen zwei Wirkungen der Spannung:

- a) dem Stromantrieb und
- b) der Kraftwirkung der Spannung.

Stromantrieb als Wirkung der Spannung bedeutet: Strom fließt nur bei Vorhandensein einer Spannung. Es ist daher möglich, mit den Wirkungen des Stromes auch eine Spannung nachzuweisen.

Die Einheit der Spannung, das Volt (1 V), ist definiert als $1 \text{ V} = 1 \frac{\text{W}}{\text{A}}$.

Man unterscheidet zwischen Spannungsmessern, die auf der Kraftwirkung, und solchen, die auf dem Stromantrieb der Spannung beruhen. Spannungsmesser, die auf der Kraftwirkung der Spannung beruhen, haben keine große technische Bedeutung. Als Spannungsmesser, die auf dem Stromantrieb der Spannung beruhen, können alle bereits besprochenen Strommesser Verwendung finden.

Spannungsmesser sind parallel zur Spannungsabfallstrecke zu schalten.

Wiederholungsfragen

- 6. Was ist der Unterschied zwischen der Urspannung und dem Spannungsabfall?
- 7. Welche Unterschiede bestehen zwischen der Urspannungserzeugung durch Umwandlung der chemischen und durch Umwand-

lung der Wärmeenergie?

8. Was sind die Wirkungen der Spannung?
9. Welche Meßinstrumente können für Strom- und Spannungsmessung verwendet werden?
10. Wie schaltet man die Strom- und wie die Spannungsmesser, um den Strom bzw. die Spannung messen zu können?

1.3. Widerstand

1.3.1. Was wird mit Widerstand bezeichnet?

Wie Sie wissen, werden die freien Elektronen als Träger der dahinströmenden Elektrizitätsmengen von einem Atomverband zum anderen weitergereicht. Dabei stoßen sie häufig auf andere Elektronen und werden aus ihrer Bahn gelenkt. Das bedeutet einen Widerstand für den Elektronenstrom. Die Größe des Widerstands gegenüber dem Stromdurchgang ist bei den verschiedenen Stoffen unterschiedlich. Das hängt vom atomaren Aufbau (Zahl der freien Elektronen) ab. Er ist außerdem abhängig von der Länge und dem Querschnitt des Leiters. Ein Leiter aus Eisen setzt dem Stromdurchgang einen größeren Widerstand entgegen als ein gleichgeformter aus Kupfer, und ein langer, schmaler Kupferkörper setzt dem Stromdurchgang einen größeren Widerstand entgegen als ein kurzer mit großem Querschnitt.

Wir wollen uns daher merken:

Die Größe des Widerstands ist von dem atomaren Aufbau des betreffenden Stoffes und von seinen geometrischen Abmessungen abhängig.

Wie Sie gesehen haben, ist die Anzahl der freien Elektronen entscheidend für die Größe des Widerstands. Stoffe, die keine freien Elektronen haben, können den Strom also nicht leiten, ihr Widerstand ist daher unendlich groß. Man bezeichnet sie auch als Nichtleiter, im Gegensatz zu den Halbleitern, die den Strom schlecht leiten, ihm also einen großen Widerstand entgegensetzen.

Die wichtigsten Vertreter der Leiter sind folgende drei Stoffgruppen:

Metalle,
metallische Legierungen,
Elektrolyte (Ionenleiter).

Zu den Nichtleitern (Isolatoren oder Dielektrika) rechnet man u.a. folgende Stoffe:

Vakuum,
gasförmige Stoffe (bei nicht zu hoher elektrischer Beanspruchung auch Luft),
flüssige Stoffe, die keine Ionenleiter sind (z.B. Öle, Petroleum, Fette, Alkohol, destilliertes Wasser),
feste Stoffe ohne frei bewegliche Elektronen (z.B. Glimmer, Quarz, Marmor, Schiefer, Salze in fester Form, Bernstein, Harze, Holz, Baumwolle, Seide, Gummi, getränktes Papier, Asbest, Lack, Hartpapier, Preßspan usw.).

Die Mehrzahl der Stoffe läßt sich entweder den Leitern oder den Nichtleitern zuordnen. Die wichtigsten Vertreter der Gruppe der Halbleiter, die eine Zwischenstellung zwischen beiden einnehmen und die einen verhältnismäßig großen Widerstand haben, sind:

Kohle,
Silizium,
Germanium,
Selen,
Kupferoxydul und
die Schwermetalloxyde wie Urandioxyd,
Titandioxyd.

Sie haben die Ursache der Eigenschaft eines Leiters, dem Stromfluß einen Widerstand entgegenzusetzen, kennengelernt. Um aber die Erscheinung des Widerstands bei einem Stromfluß genauer untersuchen zu können, müssen wir diesen Begriff erst definieren. Zunächst müssen Sie wissen, daß mit dem Begriff Widerstand zwei Dinge bezeichnet werden, nämlich:

- a) die Eigenschaft eines Körpers, sich dem Stromfluß zu widersetzen,
- b) der Träger dieser Eigenschaft selbst. Diesen bezeichnet man gelegentlich auch als Ohmsches Schaltelement (s. 1.3.5.).

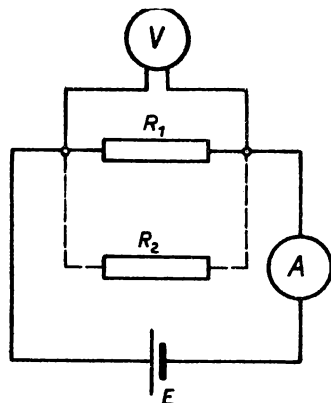


Bild 18: Schaltung zur Definition des Widerstandes

Das Formelzeichen für die Bezeichnung der physikalischen Größe "Widerstand", also der Eigenschaft, ist R . Das Symbol für das Schaltelement "Widerstand" ist Ihnen bereits aus Bild 3 bekannt.

Wie lautet die Definition des Widerstandes?

Dazu wollen wir uns folgenden Versuch ansehen:

Schalten wir eine Spannungsquelle E und einen Widerstand R zu einem geschlossenen Leiterkreis (Stromkreis) zusammen, wie in Bild 18 gezeichnet, so fließt in ihm ein Strom, dessen Stärke wir mit Hilfe des Strommessers A messen können. Der Spannungsabfall über dem Widerstand R ist dabei an dem Spannungsmesser V abzulesen. Wechseln wir nun das Ohmsche Schaltelement mit dem Widerstand R_1 gegen eines aus, das sich dem Stromfluß stärker widersetzt (R_2), so ist für die Aufrechterhaltung der gleichen Stromstärke ein größerer Spannungsabfall erforderlich. Es müßte eine größere Urspannung geliefert

werden. In einem dazu durchgeführten Versuch werden folgende Werte für den Spannungsabfall gemessen.

	I (gleichbleibend)	dazu notwendiger Spannungsabfall U
$R_1 = 10 \Omega$	2 A	20 V
$R_2 = 15 \Omega$	2 A	30 V

Wir stellen somit fest: Der erforderliche Spannungsabfall ist bei gleicher Stromstärke proportional dem Widerstand

$$U \sim R$$

Halten wir dagegen den Spannungsabfall über jedem der beiden Schaltelemente konstant, so sinkt die Stromstärke bei dem größeren Widerstand R_2 ab. Ein entsprechend durchgeführter Versuch zeigt folgendes Ergebnis:

	U (gleichbleibend)	dabei fließende Stromstärken I
$R_1 = 10 \Omega$	20 V	2 A
$R_2 = 15 \Omega$	20 V	1,33 A

Wir stellen fest: Die Stromstärke ist bei gleichem Spannungsabfall dem Widerstand umgekehrt proportional

$$\frac{1}{I} \sim R$$

Bei gleichbleibender Temperatur des Ohmschen Schaltelementes ist sein Widerstand nur vom Material und den Abmessungen abhängig. Daher gilt bei Zusammenfassung der beiden Proportionalitäten:

$$\boxed{R = \frac{U}{I}} \quad \text{Definitionsgleichung des Widerstandes} \quad (5)$$

Das bedeutet: Das Verhältnis aus Spannungsabfall und Stromstärke verhält sich wie der Widerstand; wird dieser größer, wird auch der Quotient aus Spannungsabfall und Stromstärke

an diesem Widerstand größer und umgekehrt.

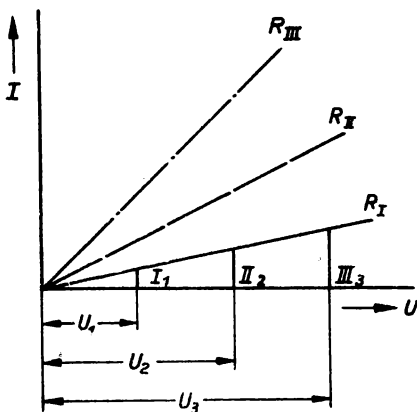
Da das Verhältnis $\frac{U}{I}$ von der Größe des Widerstandes R (Widersetzen gegen Stromfluß) bestimmt wird, kann man die Größe eines Widerstandes durch die Bildung dieses Quotienten ermitteln.

Diese Beziehungen spielen in der gesamten Elektrotechnik eine grundlegende Rolle. Sie müssen sich deshalb darüber restlos klarwerden.

1.3.2. Das Ohmsche Gesetz

Der deutsche Physiker Georg Simon Ohm (1789 - 1854) hat das nach ihm benannte Naturgesetz entdeckt, das ebenfalls an einem Experiment erläutert werden soll.

Ein Leiter R_I wird nacheinander an verschiedene Spannungen U_1, U_2, U_3 usw. gelegt und man mißt die jeweils dazugehörenden Stromstärken I_1, I_2, I_3 usw. Das gleiche wiederholt man an weiteren Leitern R_{II}, R_{III} (dabei muß ständig auf gleichbleibende Temperatur geachtet werden). Trägt man die gewonnenen Stromwerte über den dazugehörenden Spannungswerten ab, so erhält man die sogenannten Strom-Spannungs-Kennlinien (Bild 19). Es sind bei den meisten Metallen und Metallegierungen



durch den O-Punkt des Koordinatensystems verlaufende Geraden. Was bedeutet das?

Es bedeutet, daß der Widerstand bei gleichbleibenden Bedingungen (Temperatur) unabhängig von der Stromstärke ist, denn das Verhältnis aus Spannungs- und Stromstärkewerten ist bei den einzelnen Leitern immer gleich.

Bild 19: Strom-Spannungs-kennlinie

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

Ohmsches Gesetz
(Naturgesetz) (6)

Der Anstieg der Geraden ist bei gleichen Abmessungen der Leiter ein Maß für die Größe des Widerstandes des Leitermaterials.

Das Ohmsche Gesetz gestattet also, die Widerstandsbestimmung bei ganz beliebigen Strom- und Spannungswerten vorzunehmen. Der ermittelte Wert gilt dann auch bei allen anderen Strom- und Spannungswerten.

Alle Leitermaterialien, die ein dem Ohmschen Gesetz entsprechendes Verhalten aufweisen (Bild 19), bezeichnet man als Ohmsche Widerstände oder kurz Widerstände.

Die Einheit des Widerstandes trägt den Namen Ohm und wird mit dem griechischen Buchstaben Ω (Omega) abgekürzt. Sie ist folgendermaßen definiert:

Das Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt.

Mathematisch ausgedrückt:

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

Gebräuchliche Untereinheiten des Widerstandes sind:

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

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

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

Bisher haben wir zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaft eines Körpers den Widerstand, d.h. die bremsende Wirkung gegenüber dem Stromfluß, betrachtet.

Umgekehrt kann man aber auch das elektrische Leitvermögen

eines Körpers zur Charakterisierung seiner Eigenschaft heranziehen. Das ist aus Zweckmäßigkeitsgründen u.a. bei verschiedenen Berechnungen durchaus üblich. Das Leitvermögen eines Körpers ist um so größer, je kleiner der Widerstand dieses Körpers ist. Die das Leitvermögen charakterisierende physikalische Größe ist der Leitwert mit dem Formelzeichen G .

Der Leitwert G ist der Kehrwert des Widerstandes R und wird in Siemens = S gemessen (Werner v. Siemens, deutscher Ingenieur, 1816 - 1892).

$$\text{Leitwert } G = \frac{1}{\text{Widerstand } R}, \quad G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

Als Einheit ergibt sich:

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

Lehrbeispiel 1

Ein Spannungsmesser soll im Endausschlag 150 V anzeigen und dabei eine Stromstärke von 6 mA aufnehmen. Wie groß ist

- a) sein Widerstand und
- b) sein Leitwert?

Lösung:

Zur Berechnung des Widerstandes wenden wir das Ohmsche Gesetz an:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{150 \text{ V}}{0,006 \text{ A}} = 15\,000 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 25\,000 \Omega = 25 \text{ k}\Omega$$

Der Leitwert G errechnet sich aus

$$G = \frac{I}{U} = \frac{0,006 \text{ A}}{150 \text{ V}} = 0,00004 \frac{\text{A}}{\text{V}} = 0,00004 \text{ S} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ S}$$

- 1) Es empfiehlt sich immer, bei derartigen Berechnungen jede physikalische Größe (z.B. hier die Spannung - 150 V - und die Stromstärke - 0,006 A -) als Produkt aus Maßzahl (150 bzw. 0,006) und Maßeinheit (V bzw. A) aufzufassen und in den Gleichungen neben den Zahlenwerten immer die Maßeinheiten mitzuführen.

Was sehen wir aus diesen beiden Werten? Der Widerstand des Spannungsmessers ist sehr hoch. Der Spannungsabfall ist bei einem relativ geringen Stromfluß durch den Spannungsmesser sehr groß. Der Leitwert G des Spannungsmessers ist sehr klein, es kann durch ihn nur ein sehr kleiner Strom fließen.

Merken Sie sich:

Bei Berechnungen von Leitungen, wo es auf einen großen Stromfluß bei relativ geringen Widerständen ankommt, verwendet man zur Berechnung der elektrischen Eigenschaften der Leitung den Leitwert. Bei der Berechnung von Schaltelementen ist es besser, mit dem Widerstand zu rechnen.

1.3.3. Widerstands bemessungsgleichung

Wir sahen im Abschnitt 1.3.1., daß die Größe des Widerstandes von dem atomaren Aufbau des betreffenden Stoffes und von seinen geometrischen Abmessungen abhängig ist oder, spezieller ausgedrückt, die Elektronen in ihrer Bewegung um so mehr gehemmt werden, je länger und dünner der Draht ist, und je schlechter der Leiterwerkstoff an sich leitet. Wie Sie bereits wissen, ist die Größe des Widerstandes bei jedem Stoff unterschiedlich. Es muß daher eine Konstante für jeden Stoff ermittelt werden, die Vergleiche zwischen den Widerständen der einzelnen Stoffe zuläßt. Diese Werkstoffkonstante nennt man den spezifischen Widerstand ρ (Rho) oder auch Einheitswiderstand.

Der spezifische Widerstand ρ ist der Widerstand eines Leiters von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge bei 20° C.

Um den Widerstand R eines Leiters mit dem spezifischen Widerstand ρ von der Länge l und dem Leiterquerschnitt A bei 20° C zu ermitteln, müssen wir nach folgender Gleichung rechnen:

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

Widerstands-
bemessungsgleichung

(7)

Der Widerstand ist also dem spezifischen Widerstand des Materials und der Länge proportional und dem Querschnitt umgekehrt proportional. Die richtige Dimension des spezifischen Widerstands ρ erhalten wir, wenn die Gleichung (7) nach ρ aufgelöst wird. Die Länge l des Leiters messen wir in m und den Querschnitt A in mm^2 .

Als Dimension erhält man aus

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

also

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Den spezifischen Widerstand für verschiedene Leitermaterialien finden Sie in der Tabelle auf Seite 50.

Lehrbeispiel 2

Eine Kupferleitung von 50 km Gesamtlänge hat einen Querschnitt von 70 mm^2 .

Wie groß ist ihr Widerstand?

$$\rho_{\text{Kupfer}} = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Lösung:

Man erhält für die 50 km lange Leitung:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 50\,000 \text{ m}}{\text{m} \cdot 70 \text{ mm}^2} = 12,75 \Omega$$

Wie Sie selbst sehen, ist der spezifische Widerstand für Kupfer, einen guten Leiter, sehr klein. Er wird immer kleiner, je besser der Leiter den Strom leitet. Um nicht mit zu kleinen Werten rechnen zu müssen, wendet man statt des spezifischen Widerstands häufig die Leitfähigkeit κ (Kappa) an.

Unter der Leitfähigkeit κ versteht man den reziproken Wert des spezifischen Widerstands ρ

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

Die Dimension der Leitfähigkeit κ erhält man, indem man den reziproken Wert der Dimension des spezifischen Widerstands bildet:

$$[\kappa] = \left[\frac{1}{\rho} \right] = \frac{1}{\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} = \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} \quad \text{da } \frac{1}{\Omega} = \text{S}$$

Die Widerstandsbemessungsgleichung

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

lautet demnach, wenn man statt des spezifischen Widerstands ρ die Leitfähigkeit κ einsetzt:

$$\boxed{\begin{aligned} R &= \frac{1}{\kappa \cdot A} \cdot l \quad \text{oder} \\ G &= \frac{\kappa \cdot A}{l} \end{aligned}} \quad (8)$$

Lehrbeispiel 3

Rechnen Sie das Lehrbeispiel 2 mit den gleichen Werten, und zwar so, daß Sie statt des spezifischen Widerstands ρ die Leitfähigkeit κ einsetzen.

$$\kappa_{\text{Kupfer}} = 56 \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$$

Wie groß ist der Leitwert der Leitung?

Lösung:

$$R = \frac{1}{\kappa \cdot A} = \frac{50\,000 \text{ m}}{56 \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 70 \text{ mm}^2} = \underline{\underline{12,75 \Omega}}$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{12,75 \Omega} = \underline{\underline{0,0784 \text{ S}}}$$

Lehrbeispiel 4

Der Leitwert und der Widerstand eines Kupferdrahtes von 4 km Länge bei einem Querschnitt von 35 mm^2 ($6,7 \text{ mm } \varnothing$) sollen berechnet werden.

Lösung:

$$G = \frac{\kappa \cdot A}{l} = \frac{56 \frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 35 \text{ mm}^2}{4 \text{ 000 m}} = 0,49 \text{ S}$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0,49 \text{ S}} = 2,04 \Omega$$

Tafel 1

Spezifische Widerstände ρ , Leitfähigkeit κ und
Temperaturkoeffizienten α_{20}

Leiterwerkstoffe	ρ	κ	α_{20}
	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	$\frac{1}{\text{grd}}$
a) <u>reine Metalle</u>			
Silber	0,016	62,5	0,0038
Kupfer	0,01786	56	0,00393
Gold	0,023	44	0,004
Aluminium	0,02857	35	0,00377
Magnesium	0,045	22	0,0039
Wolfram	0,055	18	0,0041
Zink	0,063	16	0,0037
Nickel	0,08...0,11	13...9	0,0037...0,006
Eisen	0,10...0,15	10...7	0,0045...0,006
Zinn	0,11	9,1	0,0042
Platin	0,11...0,14	9,7...7	0,002 ...0,003
Quecksilber	0,958	1,04	0,00092

b) Legierungen

Bronze	0,018...0,056	55...18	0,004
Messing	0,07...0,09	14...11	0,0015
Neusilber (60% Cu, 17% Ni, 23% Zn)	0,30	3,33	0,00035
Nickelin (54% Cu, 26% Ni, 20% Zn)	0,43	2,3	0,00011
Manganin (84% Cu, 4% Ni, 12% Mn)	0,43	2,3	0,00004
Novokonstant (82,5% Cu, 12% Mn, 4% Al, 1,5% Fe)	0,45	2,2	0,00001
Konstantan (54% Cu, 45% Ni, 1% Mn)	0,50	2,00	-0,0000035
Chromnickel (79% Ni, 20% Cr, 1% Mn)	1,1	0,91	0,0002
Gold-Chrom (98% Au, 2% Cr)	0,33	3,0	-0,00001

c) sonstige Leiter

Kohlenstifte	65	0,015	-0,002...0,007
Graphit	20...100	0,03...0,01	-0,002...0,007

1.3.4. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

Der Widerstand eines Leiters hängt außer von der Länge, dem Querschnitt und dem Leiterwerkstoff auch noch von der Temperatur ab. Den Einfluß der Temperatur auf den Widerstand können Sie sich wie folgt stark vereinfacht vorstellen. Wie Ihnen bereits bekannt ist, sind die Ladungsträger der dahinströmen-

den Elektrizitätsmengen in einem festen Leiter die Elektronen, die bei Stromfluß von Atomverband zu Atomverband weitergereicht werden. Durch dieses Weiterreichen der freien Elektronen werden auch die übrigen Elektronen des Atomverbands zum Schwingen angeregt. Es wird ein Teil der Bewegungsenergie der freien Elektronen in Schwingungsenergie der übrigen Elektronen des Atomverbands umgesetzt. Diese Schwingungsenergie ist aber nichts anderes als Wärmeenergie. Dadurch, daß aber auch die übrigen Elektronen des Atomverbands schwingen, wird das Weiterreichen der freien Elektronen erschwert, so daß es noch zu weiteren Zusammenstößen und damit zu größeren Umsetzungen von Bewegungsenergie in Schwingungsenergie kommt. Anders ausgedrückt:

Mit steigender Erwärmung wird auch der Widerstand eines Leiters größer. Dies trifft vor allem bei Metallen, also Leitern I. Klasse, zu. Bei Leitern II. Klasse fällt dagegen mit wachsender Temperatur der Widerstand.

Wie Ihnen aus der Chemie bekannt ist, läuft eine Reaktion bei Erwärmung schneller ab; ähnlich müssen Sie sich das auch bei der Bildung von Ionen vorstellen, es können bei Erwärmung mehr Ladungsträger (Ionen) freigegeben werden, der Widerstand wird also kleiner.

Bei einer Temperaturerhöhung um 1 grd vermehrt sich der Widerstand eines Leiters I. Klasse von 1Ω nur um einen Bruchteil seines Wertes. Die Größe dieses Bruchteiles ist bei den verschiedenen Metallen unterschiedlich. Bei Kupfer beträgt er z.B. 0,00393. Nach Erwärmung eines Kupferleiters mit dem Widerstand $R_1 = 1\Omega$ um 1 grd steigt also der Widerstand dieses Leiters auf R_2 . Dieser Widerstandswert R_2 besteht aus R_1 vermehrt um den entsprechenden Bruchteil von R_1 . Mathematisch läßt sich das so ausdrücken:

$$R_2 = R_1 + \alpha \cdot R_1$$

α nennt man Temperaturkoeffizient oder Temperaturbeiwert.

Diese Größe gibt an, um welchen Bruchteil seines Wertes sich der Widerstand eines bestimmten Leitermaterials bei einer Temperaturveränderung um 1 grd ändert.

Erhöht sich die Temperatur nicht nur um 1 grd, sondern von ϑ_1 auf ϑ_2 , so vergrößert sich auch dieser Bruchteil um den Faktor $(\vartheta_2 - \vartheta_1)$. Er lautet dann $\alpha \cdot R_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1)$. Diesen Betrag der Widerstandszunahme zum Ausgangswiderstand addiert ergibt nun den veränderten Widerstandswert R_2 :

$$R_2 = R_1 + \alpha \cdot R_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1) = R_1 [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (9)$$

Mit dieser Formel läßt sich der Widerstandswert eines Leiters bei Temperaturänderungen in bestimmten Grenzen ermitteln.

Die Maßeinheit von α , die man durch Umstellung der Formel (9) nach α und Einsetzen der entsprechenden Einheiten der einzelnen Größen erhält, lautet $\frac{1}{\text{grad}}$.

Der Temperaturkoeffizient hat, je nach Außentemperatur ϑ_1 , einen unterschiedlichen Wert. Aus der Tafel 1 können Sie die Temperaturkoeffizienten α_{20} bei einer Temperatur $\vartheta_1 = 20^\circ \text{C}$ der wichtigsten Leitermaterialien ersehen.

Will man den Widerstand eines Leiters bei einer bestimmten Temperatur berechnen, so muß man, um die Tabelle benützen zu können, auch von dem Widerstand R_{20} bei 20°C ausgehen. Sie ermitteln dann mit Hilfe der Gleichung

$$R = R_{20} [1 + \alpha (\vartheta - 20^\circ \text{C})] \quad (10)$$

den Widerstand R bei einer beliebigen Temperatur.

Lehrbeispiel 5

Wie erhöht sich der Widerstand einer Kupferleitung von 160 m Länge und 6 mm^2 Querschnitt, wenn durch Sonnenbestrahlung im Sommer die Leitung von 20°C auf 45°C erwärmt wird? Um wieviel Ohm nimmt der Widerstand im Winter ab, wenn die Außentemperatur -20°C beträgt?

Lösung:

Widerstand bei 20° C:

$$\begin{aligned} R_{20} &= \frac{P \cdot l}{A} \\ &= 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{160 \text{ m}}{6 \text{ mm}^2} \\ &= 0,476 \Omega \\ &===== \end{aligned}$$

Widerstand bei 45° C:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{20} \cdot [1 + \alpha (T - 20^\circ \text{ C})] \\ &= 0,476 \Omega \cdot [1 + 0,00393 \frac{1}{\text{grd}} (45^\circ \text{ C} - 20^\circ \text{ C})] \\ &= 0,476 \Omega + 0,0468 \Omega \\ &= 0,523 \Omega \\ &===== \end{aligned}$$

Widerstand bei -20° C:

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_{20} \cdot [1 + \alpha (T - 20^\circ \text{ C})] \\ &= 0,476 \Omega \cdot [1 + 0,00393 \frac{1}{\text{grd}} (-20^\circ \text{ C} - 20^\circ \text{ C})] \\ &= 0,476 \Omega \cdot [1 + 0,00393 \frac{1}{\text{grd}} (-40 \text{ grd})] \\ &= 0,401 \Omega \\ &===== \end{aligned}$$

Widerstandsänderung bei + 45° C:

$$\begin{aligned} R_{zu} &= R_1 - R_{20} = 0,523 \Omega - 0,476 \Omega \\ &= 0,047 \Omega \\ &===== \end{aligned}$$

Widerstandsänderung bei -20° C:

$$\begin{aligned} R_{ab} &= R_2 - R_{20} = 0,401 \Omega - 0,476 \Omega \\ &= -0,075 \Omega \\ &===== \end{aligned}$$

Wie Sie aus der Tafel 1 ersehen können, ist bei den meisten Leitern der Temperaturkoeffizient α positiv. Damit steigt der Widerstand mit zunehmender Erwärmung. Bei einigen ist aber α negativ, so daß der Widerstand bei diesen (z.B. Kohle $\alpha_{20} = -0,0002 \dots 0,0008 \frac{1}{\text{grd}}$) mit zunehmender Temperatur abnimmt. Als Faustformel können Sie sich merken:

Bei der Mehrzahl der metallischen Leiter tritt bei einer Temperaturerhöhung um 1 grd eine Widerstandszunahme von 0,4 % ein. (Die Temperaturkoeffizienten fast aller Metalle schwanken um den Wert $\alpha \approx 0,004 \frac{1}{\text{grd}}$.)

Deshalb kann man temperaturabhängiges Widerstandsmaterial nur für bestimmte Zwecke verwenden. Würde man beispielsweise einen Widerstand aus temperaturabhängigem Material in einen Spannungsmesser einbauen, dann zeigte das Instrument - je nach Außentemperatur - verschiedene Werte an. Zum Bau von Präzisions- und Regelwiderständen verwendet man deshalb keine reinen Metalle, sondern Metallegierungen, besonders aus Kupfer und Nickel (z.B. Manganin, Konstantan), deren Widerstand nur sehr gering temperaturabhängig ist (Konstantan $\alpha_{20} = -0,0000035 \frac{1}{\text{grd}}$).

Lehrbeispiel 6

Um wieviel Grad darf sich die Temperatur eines Kupfer- und eines Novokonstantdrahtes von 20° C ändern, wenn eine Widerstandsänderung von 0,3 % eintreten soll?

Lösung:

Wenn eine Widerstandsänderung von 0,3 % eintreten soll, muß sich

$$R : R_{20} = 1,003 : 1$$

verhalten oder

$$R : R_{20} = 1,003$$

sein.

Bei Anwendung der Gleichung

$$R = R_{20} \left[1 + \alpha (\vartheta - 20^{\circ} \text{ C}) \right]$$

bringt man R_{20} auf die linke Seite:

$$R : R_{20} = 1 + \alpha (\vartheta - 20^{\circ} \text{ C})$$

also

$$1,003 = 1 + \alpha (\vartheta - 20^{\circ} \text{ C})$$

oder

$$\frac{0,003}{\alpha} = \vartheta - 20^{\circ} \text{ C}$$

$$\begin{aligned} \text{Man erhält für Kupfer: } \vartheta - 20^{\circ} \text{ C} &= \frac{0,003}{0,00393 \frac{1}{\text{grd}}} \\ &= 0,763 \text{ grad} \\ &===== \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{und für Novokonstant: } \vartheta - 20^{\circ} \text{ C} &= \frac{0,003}{0,00001 \frac{1}{\text{grd}}} \\ &= 300 \text{ grad} \\ &===== \end{aligned}$$

Chemisch reines Eisen macht eine Ausnahme im Temperaturverhalten der Metalle. Der Temperaturkoeffizient ϑ hat bis zu etwa 100° C laut Tafel 1 den Wert $\vartheta_{20} = 0,0045 \frac{1}{\text{grd}}$. Dieser Wert nimmt mit steigender Temperatur stark zu; bis er bei 850° C seinen Höchstwert $\alpha = 0,018 \frac{1}{\text{grd}}$ erreicht hat, um dann bis etwa auf $\alpha = 0,0067 \frac{1}{\text{grd}}$ zurückzugehen. Praktisch kann man den hohen Temperaturkoeffizienten des Eisens zur automatischen Regulierung der Stromstärke verwenden. Schaltet man einen Eisendraht in einen Stromkreis mit anderen Widerständen, dann wird der Widerstand des Kreises stark temperaturabhängig. Erhöht man die Spannung an den Enden des Stromkreises, dann müßte gleichzeitig auch die Stromstärke zunehmen, wenn sich nicht zugleich der Widerstand des Eisendrahtes durch die entstehende Temperaturerhöhung vergrößerte. Es ist also möglich, durch passende Wahl der Abmessungen des Eisenwiderstands die Stromstärke auch bei Spannungserhöhung in einem

Stromkreis nahezu konstant zu halten. Zur besseren Haltbarkeit werden die Eisendrähte in mit Wasserstoffgas gefüllte Glasröhrchen eingeschmolzen (Eisenwasserstoff-Widerstand).

Fllt die Temperatur bis in die Nähe des absoluten Nullpunktes, dann sinkt der Widerstand bei einer Reihe von Elementen und Verbindungen sehr plötzlicly auf einen unmeßbar kleinen Wert. Diese Erscheinung bezeichnet man als "Supraleitung".

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Leitern I. Klasse nützt man in der Technik zur Temperaturmessung aus. Man bedient sich dabei der Widerstandsthermometer. Diese arbeiten nach folgendem Prinzip:

Ein Leiter mit stark temperaturabhängigem Widerstand wird über eine Zuleitung mit einer Spannungsquelle verbunden. In diesen geschlossenen Leiterkreis schaltet man einen Strommesser, dessen Skala in Temperatureinheiten geeicht ist. Bringt man nun den Leiter mit temperaturabhängigem Widerstand an die Stelle, an der die Temperatur gemessen werden soll (z.B. Kühlwasser beim Kraftfahrzeug), so geht folgendes vor sich:

Bei gleichbleibender Spannung ist der Zeigerausschlag des in Grad geeichten Strommessers abhängig von der Stromstärke I. Diese errechnet sich nach $I = \frac{U}{R}$. U als konstant vorausgesetzt, verändert sich I mit R, und zwar im umgekehrten Verhältnis. Je nachdem wie nun die Temperatur (in unserem Falle des Kühlwassers) steigt oder fllt, steigt oder fällt auch der Widerstand des Widerstandsthermometers. Dementsprechend fllt oder steigt die Stromstärke, deren GröÖe wir auf der Skala als Temperatureinheiten ablesen.

1.3.5. Technische Ausführungsformen von Widerständen

Wie Ihnen bereits bekannt ist, nennt man Schaltelemente, die zum Verwirklichen bestimmter Widerstandswerte gebaut werden, ebenfalls Widerstände.

Es wird dabei zwischen a) Festwiderständen und
b) veränderlichen Widerständen
unterschieden.

Festwiderstände

sind Schaltelemente, die für einen bestimmten Ohmwert gebaut sind. Die Größe des Schaltelements ist abhängig von dem höchstmöglichen Stromfluß. Meist wird zur Herstellung von Widerständen Leitermaterial mit großem ρ bevorzugt. Sollen Widerstände für Meßzwecke verwendet werden, dann darf man nur Material mit kleinem Temperaturkoeffizienten α benutzen, um die Meßergebnisse bei Temperaturschwankungen nicht zu verfälschen. Am besten eignet sich dafür Manganin oder Konstantan. Für andere Festwiderstände verwendet man meist Kohle oder Chromnickel.

Veränderliche Widerstände

Bei veränderlichen Widerständen unterscheidet man zwischen Stufenwiderständen und stufenlosen Widerständen.

Schiebewiderstände (Bild 20)

sind meist wie folgt aufgebaut:
Auf einem Isolierkörper ist spulenförmig Widerstandsmaterial aufgewickelt. Mit Hilfe eines Schiebers, an dem ein Gleitkontakt angebracht ist, kann der Ohmwert des Widerstands in Stufen verändert werden.

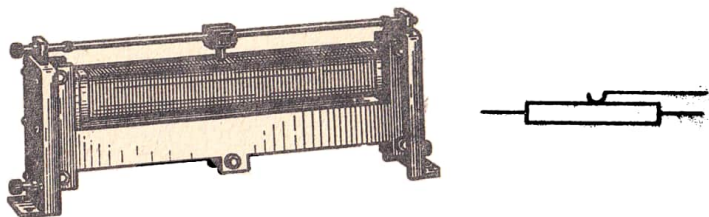


Bild 20: Schiebewiderstand mit Schaltzeichen für
stufig verstellbare Widerstände

In der Schwachstromtechnik benutzt man als stufenlosen Widerstand das Potentiometer. Als Widerstandsmaterial wird je nach Belastung und Widerstandswert Widerstandsdraht (Bild 21) oder Kohle benutzt. Diese wird besonders für hohe Widerstandswerte verwendet.

Beim Potentiometer gleitet ähnlich wie beim Schiebewiderstand ein Kontakt auf dem Widerstandsmaterial (Kohle oder Widerstandsdraht), mit dem stufenlos ein bestimmter Widerstandswert eingestellt werden kann.

Mit dem Kurbelwiderstand kann man den Widerstand in bestimmten Stufen regeln. Er ist Ihnen vielleicht als Anlaufwiderstand für Motoren und als Regelwiderstand für die Beleuchtung in Kinos bekannt. Den schematischen Aufbau eines Kurbelwiderstands sehen Sie aus Bild 22.

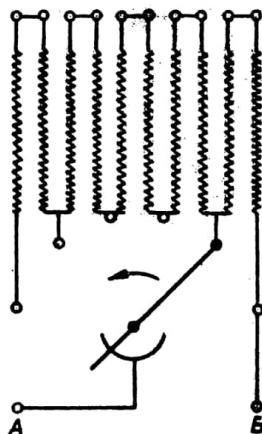


Bild 22: Kurbelwiderstand

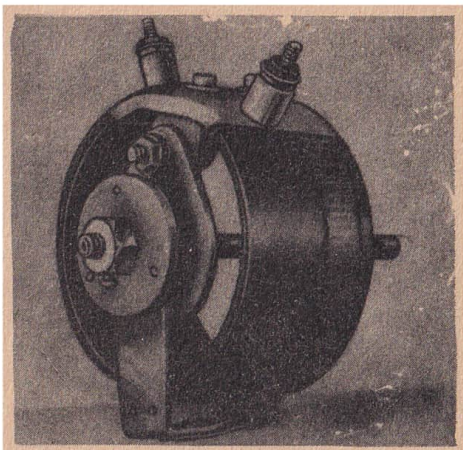


Bild 21: Potentiometer mit Schaltzeichen für stetig verstellbare Widerstände.

Der Stöpselwiderstand wird hauptsächlich nur noch im Labor verwendet. Bei ihm (Bild 23) sind Drähte von geeigneten Widerständen passend zusammengestellt. Bild 24 zeigt schematisch den Aufbau eines Stöpselwiderstands.

Jeder einzelne Widerstandsdraht ist an seinen beiden Enden mit je einem Metallklötzchen auf dem

Deckel des Widerstandskastens verbunden. Je zwei benachbarte Metallklötzchen können durch einen eingeschliffenen Metallstößel leitend miteinander verbunden werden. Durch das Einsetzen des Stößels wird der Widerstandsdraht überbrückt, der Widerstand also ausgeschaltet. Bei einem Stößelwiderstand sind demnach nur die Widerstände eingeschaltet, die nicht durch einen Metallstößel überbrückt sind. Nach Bild 24 wären demnach die Widerstandswerte der Widerstände 2 und 3 wirksam.

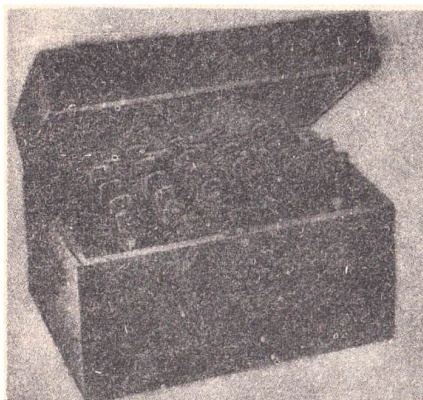


Bild 23:
Stößelwiderstand

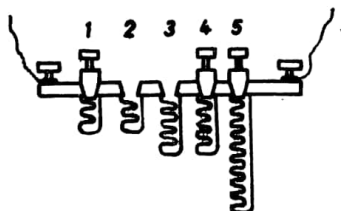


Bild 24: Wirkungsweise des
Stößelwiderstandes

Zusammenfassung ~

Als Widerstand bezeichnet man sowohl die elektrische Eigenschaft des Schaltelements, sich dem Stromdurchgang zu widersetzen, als auch den Träger dieser Eigenschaft, das Schaltelement selbst. Nach der Größe des Widerstands der einzelnen Stoffe unterscheidet man zwischen Leitern, Halbleitern und Nichtleitern.

Der Widerstand ist definiert durch die Gleichung

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

Die Einheit des Widerstands, das Ohm (Ω), erhält man durch Einsetzen der Einheiten an Stelle der Größen in der Definitionsgleichung

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

Mit Hilfe der Widerstandsbemessungsgleichung

$$R = \rho \cdot \frac{1}{A}$$

kann der Widerstand von drahtförmigen Leitern bestimmt werden. Der spezifische Widerstand ρ ist der Widerstand eines Leiters von 1 mm^2 Querschnitt und 1 m Länge bei 20° C .

Den Kehrwert des spezifischen Widerstands ($\frac{1}{\rho}$) bezeichnet man als spezifische Leitfähigkeit (σ)

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

den Kehrwert des Widerstands (R) als Leitwert (G)

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

Die Einheit des Leitwertes (G) ist das Siemens (S)

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

Bei Temperaturänderungen verändert sich auch der Widerstand eines Stoffes. Der Temperaturkoeffizient α ist der Faktor für die Widerstandsänderung eines bestimmten Stoffes bei einer Temperaturänderung um 1 grad .

Das Schaltelement Widerstand wird als Fest- oder auch als veränderlicher Widerstand angewendet. Bei den veränderlichen Widerständen unterscheiden wir zwischen Schiebe-, Kurbel- und Stöpselwiderständen und Potentiometern.

Wiederholungsfragen

11. Welche Form hat die Strom-Spannungskennlinie bei Metallen?
12. Was ist der Unterschied zwischen dem Leitwert und der Leitfähigkeit?
13. Was versteht man unter dem spezifischen Widerstand eines Leiters?
14. Welche Faustformel gilt für den Prozentsatz der Widerstandszunahme bei einer Temperaturerhöhung um 1 grd bei Metallen?
15. Worin liegt der Unterschied zwischen einem Schiebewiderstand und einem Kurbelwiderstand?

Übungen

1. Wie groß ist der Widerstand eines 0,5 km langen Kupferdrahtes mit einem Durchmesser von 1,38 mm?
2. An welcher Spannung erhält ein menschlicher Körper mit 2000 Ω Widerstand einen bereits tödlichen Strom von 50 mA?
3. Welchen Widerstand muß eine elektrische Kochplatte haben, die bei einer Spannung von 220 V einen Strom von 6 Ampere aufnehmen soll?
4. Ein Spannungsmesser soll im Endausschlag 240 V anzeigen und dabei eine Stromstärke von 6 mA aufnehmen. Welchen Widerstand muß er haben?
5. Welchen Widerstand hat 1 km Eisenbahnschiene, wenn sie 35 kg pro laufenden Meter wiegt, einen spezifischen Widerstand

$$\rho = 0,125 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

und ein spezifisches Gewicht

$$\gamma = 7,8 \text{ kg/dm}^3$$

hat?

Antworten und Lösungen

1. gegeben: $l = 500 \text{ m}$
 $d = 1,38 \text{ mm}$
 $\rho_{\text{Cu}} = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (lt. Tabelle)

gesucht: $R = ?$

Lösung: $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$

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

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho \cdot l \cdot 4}{d^2 \cdot \pi} \\ &= \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 500 \text{ m} \cdot 4}{1,38^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot 3,14} \\ &= \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 500 \text{ m} \cdot 4}{\text{m} \cdot 1,9 \text{ mm}^2 \cdot 3,14} \end{aligned}$$

$$R = 5,98 \Omega$$

=====

2. gegeben: $R = 2000 \Omega$, $I = 0,05 \text{ A}$

gesucht: $U = ?$

Lösung: $U = I \cdot R$
 $= 0,05 \text{ A} \cdot 2000 \Omega$
 $U = 100 \text{ V}$
=====

3. gegeben: $U = 220 \text{ V}$

$$I = 6 \text{ A}$$

gesucht: $R = ?$

Lösung: $R = \frac{U}{I}$
 $= \frac{220 \text{ V}}{6 \text{ A}}$
 $R = 36,7 \Omega$
 =====

4. gegeben: $U = 240 \text{ V}$
 $I = 0,006 \text{ A}$

gesucht: $R = ?$

Lösung: $R = \frac{U}{I}$
 $= \frac{240 \text{ V}}{0,006 \text{ A}} = 40\,000 \Omega$
 =====

5. gegeben: $l_s = 1000 \text{ m}$
 $G = 35 \text{ kg/m}$
 $\rho = 0,125 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
 $\gamma = 7,8 \text{ kg/dm}^3$

gesucht: $R = ?$

Lösung: $R = \frac{\rho \cdot l_s}{A}$

$$A = \frac{V}{l}$$

$$V = \frac{G}{\gamma}$$

$$A = \frac{G}{\gamma \cdot l}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l_s \cdot \gamma \cdot l}{G}$$

$$= \frac{0,125 \cdot \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ m} \cdot 7,8 \frac{\text{kg} \cdot \text{dm}^3}{\text{dm}^3} \cdot 1 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}}{35 \text{ kg}}$$

$$R = 0,0279 \Omega$$

 =====

Antworten auf die Wiederholungsfragen

=====

1. Leiter I. Klasse sind feste metallische Körper. Der Stromfluß im Leiter ist dabei ein Wandern der Elektronen von Atom zu Atom. Leiter II. Klasse sind in der Regel Flüssigkeiten, in denen das Strömen der Ionen von der Anode zur Kathode den Strom darstellt.
2. Zur Festlegung der Einheit der Stromstärke benutzt man neuerdings die magnetische Wirkung des Stromes.
3. Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist die Amperesekunde, die man auch als Coulomb bezeichnet.
4. Die Strommesser werden in den Strompfad geschaltet.
5. Die Dreheiseninstrumente können für Gleich- und Wechselstrommessungen verwendet werden. Die Drehspulinstrumente werden für Gleichstrommessungen verwendet, beim Zwischenschalten eines Gleichrichters können sie auch für Wechselstrommessungen benutzt werden.
6. Die Ursprung, deren Sitz sich in der Spannungsquelle befindet, ist die Ursache für den Bewegungsdrang (Antriebsenergie) der Ladungsträger. Diese werden bei ihrer Wanderung durch den Leiter abgebremst. Die Differenz an Bewegungsenergie zwischen zwei Punkten eines Leiters nennt man Spannungsabfall. Die Voraussetzung, daß ein Spannungsabfall auftreten kann, ist das Vorhandensein einer Ursprung.
7. Im Gegensatz zur Erzeugung einer Ursprung durch Umwandlung chemischer Energie, bei der ein fester Leiter und ein Elektrolyt zusammenstößt, sind bei der Umwandlung der Wärmeenergie in Elektroenergie unmittelbar zwei feste Leiter miteinander verbunden. Bei der chemischen Ursprungserzeugung beruht die Energieumwandlung auf dem Aufeinanderstoßen von Ionen. Das trifft jedoch nicht für die Umwandlung der Wärmeenergie zu; hier ist die Ursache der Ursprungserzeugung in dem Aufeinanderprallen von Elektronen zu finden.

8. Die Wirkungen der Spannung sind:
 - a) die Kraftwirkung,
 - b) der Stromantrieb.
9. Alle Strommesser können auf Grund der 2. Wirkung der Spannung, des Stromantriebs, auch zur Spannungsmessung verwendet werden.
10. Strommesser werden in den Strompfad und Spannungsmesser parallel zum Strompfad geschaltet.
11. Die Strom-Spannungskennlinie bei Metallen ist eine Gerade, die durch den Ursprung des Koordinatensystems verläuft.
12. Der Leitwert (G) ist der reziproke Widerstand ($\frac{1}{R}$) und die Leitfähigkeit (κ) der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes (ρ): $\kappa = \frac{1}{\rho}$.
13. Unter dem spezifischen Widerstand eines Leitermaterials verstehen wir den Widerstand des Leiters von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge bei 20° C.
14. Der Widerstand der Mehrzahl der Metalle nimmt bei einer Temperaturerhöhung um 1 grd ungefähr um 0,4 % zu.
15. Der Widerstandswert läßt sich bei einem Schiebewiderstand nahezu stufenlos verändern, während beim Kurbelwiderstand feste Stufen vorgesehen sind.

Literaturnachweis

Lehrbriefe für das Fachschulfernstudium "Grundlagen der Elektrotechnik", 1. Ausgabe

- | | |
|---------------|--|
| Moeller-Wolff | Grundlagen der Elektrotechnik, Bd. I,
B.G. Teubner, Stuttgart 1958 |
| Schönfeld | Die wissenschaftlichen Grundlagen der
Elektrotechnik,
Hirzel Verlag, Leipzig 1952 |
| Kammerloher | Elektrotechnik des Rundfunktechnikers,
Teil I: Gleichstrom,
Deutscher Funk-Verlag GmbH,
Berlin-Treptow 1949 |
| Lindner | Elektro-Aufgaben, Teil I: Gleichstrom,
Fachbuchverlag, Leipzig 1954 |

Quellennachweis der Bilder

Lehrbriefe für das Fachschulfernstudium "Grundlagen der Elektrotechnik", 1. Ausgabe

- | | |
|-----------|--|
| Grimsehl | Lehrbuch der Physik, Bd. II,
B.G. Teubner, Leipzig 1951
Bild 20, 22, 23, 24 |
| Schönfeld | Die wissenschaftlichen Grundlagen der
Elektrotechnik,
Hirzel Verlag, Leipzig 1952, Bild 11 |
| Lindner | Lehrbuch der Physik, Bd. III,
Fachbuchverlag, Leipzig, Bild 21 |
| Weickert | Hochspannungsanlagen,
Fachbuchverlag, Leipzig 1955, Bild 9 |

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

GRÄSSLER/HENNIG

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHELEKTRO- TECHNIKER

2

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHÜLAUS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-02/62

Herausgeber:
Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 2

von

Dipl.-Ing. oec. Rolf Gräßler und Dipl.-Gwl. Raimund Hennig

2. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
1.4. Stromkreise	3
1.4.1. Der unverzweigte Stromkreis	4
1.4.1.1. Die Reihenschaltung von Widerständen	4
1.4.1.2. Der Grundstromkreis	6
1.4.1.3. Der Leitungswiderstand	14
1.4.2. Verzweigte und vermaschte Stromkreise	20
1.4.2.1. Das 1. Kirchhoffsche Gesetz	20
1.4.2.2. Parallelschaltung von Widerständen	21
1.4.2.3. Gegenüberstellung Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen	26
1.4.2.4. Gemischte Schaltung von Widerständen	27
1.4.2.5. Anwendung der Reihen- und Parallelschaltung zur Erweiterung der Meßbereiche von Spannungs- und Strommessern	28
1.4.2.6. Einfache Schaltungen von Spannungsquellen	35
1.4.2.7. Das 2. Kirchhoffsche Gesetz (Maschensatz)	47
1.5. Elektrische Energie und Leistung	53
1.5.1. Grundbeziehungen	53
1.5.1.1. Allgemeines	54
1.5.1.2. Elektrische Energie und Leistung	56
1.5.2. Umformung elektrischer Energie in Wärmeenergie und umgekehrt	69
1.5.2.1. Grundbeziehungen	69
1.5.2.2. Anwendungen	75
1.5.2.3. Umformung von Wärmeenergie in elektrische Energie	82
Antworten auf die Wiederholungsfragen	88
Antworten und Lösungen	90
Literaturnachweis	95

1.4. Stromkreise

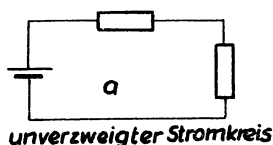
Die Grundbegriffe der Elektrotechnik haben Sie im Lehrbrief 1 kennengelernt. Im ersten Teil des 2. Lehrbriefes sollen Sie lernen, sie anzuwenden. Unter Anwendung der Grundbegriffe bzw. der Größen, die sich hinter diesen Begriffen verbergen, verstehen wir die Betrachtung des Zusammenspiels der drei grundlegenden Größen Stromstärke, Spannung und Widerstand sowie dabei notwendig werdende Berechnungen. Ein Zusammenspiel dieser Größen ist nur in Stromkreisen möglich.

Stromkreise sind Zusammenschaltungen von Spannungsquellen und Widerständen mit Hilfe von Verbindungsleitungen.

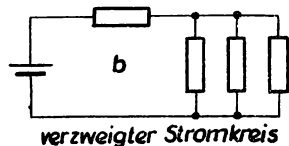
Unter Berechnung von Stromkreisen versteht man die Berechnung einzelner im Stromkreis wirkender Größen. Dabei werden andere, ebenfalls in diesem Stromkreis wirkende, wertmäßig bekannte Größen zugrunde gelegt.

In der Praxis treten die Stromkreise in den mannigfaltigsten Formen auf, angefangen von dem einfachen Stromkreis, bestehend z.B. aus Taschenlampenbatterie und Glühlämpchen, bis zu den mehrfach gespeisten Leitungsnetzen unserer Stromversorgungsanlagen. Diese Vielzahl der Möglichkeiten läßt sich jedoch auf die folgenden drei Grundtypen der elektrischen Stromkreise zurückführen:

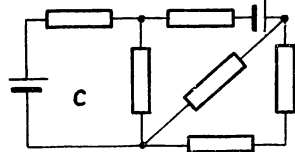
- a) den unverzweigten Stromkreis
(Bild 1a), z.B. Taschenlampenbatterie mit zwei Glühlampen,
- b) den verzweigten Stromkreis
(Bild 1b), z.B. Batterie u. mehrere Verbraucher, die so angeordnet sind, daß verzweigte Strombahnen entstehen,
- c) den vermaschten Stromkreis
(Bild 1c), z.B. das Hochspannungsnetz eines Landes, das durch



unverzweigter Stromkreis



verzweigter Stromkreis



vermaschter Stromkreis

Bild 1a - c

mehrere Kraftwerke gespeist wird. Verzweigte und vermaschte Stromkreise nennt man auch Stromnetze.

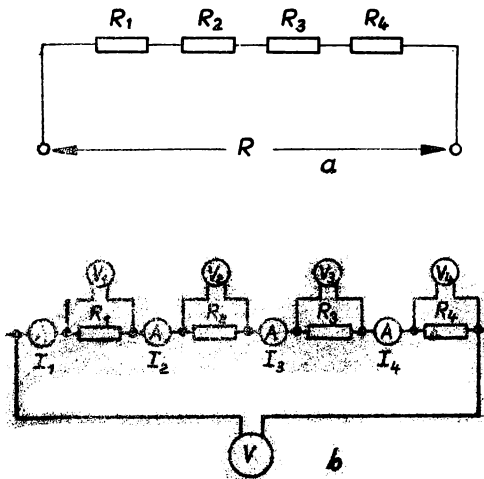
1.4.1. Der unverzweigte Stromkreis

1.4.1.1. Die Reihenschaltung von Widerständen

Beim Zusammenschalten von Ohmschen Schaltelementen mit gleichen oder unterschiedlichen Widerstandswerten erhält man einen Ersatzwiderstandswert, der sich von den einzelnen Widerstandswerten der zusammengeführten Schaltelemente unterscheidet. Man kann daher den Widerstand eines beliebigen Ohmschen Schaltelementes durch geeignetes Zusammenfügen von Schaltelementen mit anderen Widerstandswerten ersetzen.

Es gibt zwei Möglichkeiten des Zusammenfügens oder "Schaltens" von Schaltelementen und die Verknüpfung dieser beiden Möglichkeiten; die Reihen-, Parallel- und Gemischtschaltung.

Zunächst sollen Sie die Reihenschaltung (oder Hintereinanderschaltung) kennenlernen.



Eine Reihenschaltung z.B. von vier Ohmschen Schaltelementen zeigt das Bild 2a. Sie sehen, daß bei dieser Schaltung derselbe Strom alle Widerstände der Reihe nach durchfließt. Zur Ableitung des Gesetzes, nach dem der bei Reihenschaltung sich ergebende Ersatzwiderstand berechnet wird, soll der Versuch nach Bild 2b durchgeführt werden.

Mit Hilfe der Strommesser wird jeweils vor und hinter den Schaltelementen die Stärke des durchfließenden Stromes gemessen, und die Spannungsmesser zeigen die

Bild 2a u. b: Reihenschaltung von Widerständen

Spannungsabfälle über den einzelnen Widerständen an.

Es wurden folgende Meßwerte aufgenommen:

I_1	I_2	I_3	I_4	I
2,5A	2,5A	2,5A	2,5A	2,5A
U_1	U_2	U_3	U_4	U
25V	18V	15V	42V	100V

Daraus läßt sich ableiten:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$$

Dividiert man die zweite Zeile durch die erste, so ergibt sich:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} + \frac{U_4}{I} + \dots + \frac{U_n}{I}$$

Da $R = \frac{U}{I}$, kann man dafür schreiben:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n \quad (1)$$

Damit haben Sie die Formel für die Berechnung des Ersatzwiderstandes bei Reihenschaltung von Ohmschen Schaltelementen.

Bei Reihenschaltung von Ohmschen Schaltelementen ist der Ersatz- oder Gesamtwiderstand gleich der Summe der einzelnen in Reihe geschalteten Widerstände. Daher ist bei Reihenschaltung der Ersatzwiderstand stets größer als der größte Einzelwiderstand.

Bei Reihenschaltung von n Schaltelementen mit gleichem Widerstand rechnet man zweckmäßigerweise nach der Formel

$$R = n \cdot R_1$$

Eine weitere wichtige Erkenntnis, die sich aus dem Versuch ableiten läßt, lautet:

Bei der Reihenschaltung von Ohmschen Schaltelementen ist die Stromstärke an allen Punkten des Stromkreises gleich groß.

Diese Tatsache prägen Sie sich gut ein. Sie bestätigt uns, daß der elektrische Strom ein in sich geschlossenes Band ist, das sich wie eine inkompressible Flüssigkeit verhält.

1.4.1.2. Der Grundstromkreis

Unter dem Grundstromkreis verstehen wir die einfachste Form eines unverzweigten Stromkreises, er ist die einfachste Form eines Stromkreises überhaupt.

Der Grundstromkreis (Bild 3a) besteht aus einer Spannungsquelle, einem Belastungswiderstand und den dazugehörigen Verbindungsleitungen. An ihm sollen Sie die grundlegenden Gesetze des Stromkreises kennenlernen. Es handelt sich bei diesen Gesetzen um das Zusammenspiel der drei Ihnen bereits bekannten Größen Stromstärke, Spannung und Widerstand.

Zur besseren Veranschaulichung der wirklichen Verhältnisse wurde im Bild 3b das Ersatzschaltbild des Grundstromkreises dargestellt. Diese Darstellung des Grundstromkreises werden Sie mit den bisher erworbenen Kenntnissen ohne weiteres erklären können!

Sie haben bereits gelernt, daß die Antriebsenergie der Elektronen, die Urspannung, anteilmäßig längs des Stromkreises aufgebraucht wird, wir sprechen vom Spannungsabfall (siehe Lbf. 1, 1.2.2.). Nun ist jede Spannungsquelle ja auch ein Bestandteil des Stromkreises und somit eine Spannungsabfallstrecke, denn der Strom muß ja auch durch sie hindurchgetrieben werden. Dabei wird ein Teil der erzeugten Urspannung aufgebraucht. Das ist ohne weiteres einleuchtend, wenn man sich die bekannten Spannungsquellen vorstellt. Ein Generator z.B., in dem die Urspannung erzeugt wird, stellt mit seinen Kupferwicklungen für den Stromdurchgang ebenso einen Widerstand dar, wie irgend ein anderer Teil des Stromkreises (elektr. Gerät, Leitung usw.). Das trifft auch bei der chemischen Spannungsquelle zu, bei der der Elektrolyt als Widerstand auftritt. Diesen Widerstand im Inneren einer Spannungsquelle bezeichnet man als Innenwiderstand R_1 .

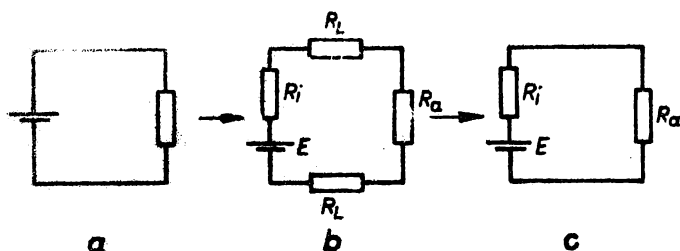


Bild 3a-c: Grundstromkreis

Wie wirkt sich dieser Innenwiderstand R_i aus? Er bewirkt, daß ein Teil der Bewegungsenergie, die die Ladungsträger durch die Urspannung erhalten haben, bereits im Inneren der Spannungsquelle wieder verbraucht wird; es ist also ein Spannungsabfall in der Spannungsquelle zu verzeichnen. Dieser Zusammenhang wird in der Darstellung 3b) dadurch anschaulich gemacht, daß R_i als Widerstand der Spannungsquelle zusätzlich zur Spannungsquelle gezeichnet wird.

In den beiden Schaltelementen R_L ist der Widerstand der Zuleitungen zur Vereinfachung für unsere Betrachtungen konzentriert. Das Ohmsche Schaltelement R_a stellt irgendein elektrisches Gerät, einen Verbraucher, mit einem bestimmten Ohmschen Widerstandswert dar. Er wird im Gegensatz zum Innenwiderstand R_i als Außenwiderstand bezeichnet.

Im Bild 3c) sind die beiden Widerstände R_L vernachlässigt, da sie auf die Ableitung der Gesetze keinen grundsätzlichen Einfluß haben. Worauf es hier zunächst ankommt, ist die Erkenntnis, daß R_i und R_a stets in Reihe liegen. Wir müssen also die Gesetze der Reihenschaltung voraussetzen.

Betrachten wir nun die Gesetzmäßigkeiten im Grundstromkreis.

Der Gesamtwiderstand (oder Ersatzwiderstand) in diesem Stromkreis setzt sich bei Vernachlässigung des Leitungswiderstandes wie folgt zusammen:

$$R_{ges} = R_a + R_i$$

Nun zu den Spannungsverhältnissen im Grundstromkreis.

Sie haben bereits gelernt, daß an den Klemmen einer Spannungs-

quelle, die einen Strom antreiben muß, nicht mehr die volle Ursprungsspannung zur Verfügung steht, sondern durch den inneren Widerstand R_i die Antriebsenergie der Elektronen geschwächt, d.h. ein Spannungsabfall eingetreten ist. Diesen Spannungsabfall, der im Inneren der Spannungsquelle durch R_i hervorgerufen wird, bezeichnen wir als inneren Spannungsabfall U_i . Es gilt daher unter Anwendung des Ohmschen Gesetzes: Fließt ein Strom in einem Grundstromkreis, so tritt in der Spannungsquelle mit dem inneren Widerstand R_i ein Spannungsabfall U_i ein. Es gilt demnach:

Innerer Spannungsabfall

$$\boxed{U_i = I \cdot R_i} \quad (2)$$

Dabei ist I die an jeder Stelle des unverzweigten Stromkreises gleiche Stromstärke. Sie läßt sich auch ermitteln nach

$$I = \frac{E}{R_{\text{ges}}} = \frac{E}{R_i + R_a}$$

woraus weiter folgt:

$$I(R_i + R_a) = E$$

$$I \cdot R_i + I \cdot R_a = E$$

$$I \cdot R_a = E - I \cdot R_i$$

$$U = E - U_i$$

Diese letzte Zeile können Sie bereits selbst erläutern:

U ist die Spannung, die nach Abzug des inneren Spannungsabfalls U_i von der Ursprungsspannung E an den Klemmen der Spannungsquelle noch zur Verfügung steht. Sie wird daher als Klemmenspannung U_k bezeichnet. Es ist die Antriebsenergie, die den Strom im äußeren Stromkreis bewirkt.

Aus unserer Ableitung geht auch hervor, daß diese Spannung U gleich dem Spannungsabfall im äußeren Stromkreis ist

$$(I \cdot R_a = U_a).$$

Das bedeutet, die Klemmenspannung ist gleich dem Spannungsabfall, der im äußeren Widerstand auftritt und der zum Antrieb der Stromstärke I aufgebracht werden muß. Es könnte die Frage entstehen: Was geschieht, wenn der äußere Widerstand R_a klei-

ner bzw. größer wird? Müßte dann nicht Antriebsenergie übrig sein bzw. fehlen?

Das ist nicht so. In Lehrbrief 1, Seite 43, haben Sie gelernt, daß sich der Spannungsabfall bei konstanter Stromstärke proportional zum Widerstand verhält, und daß sich die Stromstärke bei konstanter Spannung umgekehrt proportional zum Widerstand verhält. (Lesen Sie diese Ausführungen nochmals nach!) Würde nun im Grundstromkreis der äußere Widerstand R_a verringert werden, so würde die vorgegebene Klemmenspannung eine größere Stromstärke antreiben. Der umgekehrte Vorgang wäre bei Vergrößerung von R_a zu verzeichnen: Die Antriebsenergie der Klemmenspannung würde auch in diesem Falle restlos aufgebraucht durch das Antreiben eines entsprechend kleineren Stromes.

Zusammenfassend und in die mathematische Form gebracht bedeutet das:

$$\begin{aligned} U_k &= E - U_1 \\ &= E - I \cdot R_1 \end{aligned} \quad (3)$$

da $U_k = U_a$

gilt $U_k = I \cdot R_a$ (4)

Diese Zusammenhänge sind von grundlegender Bedeutung. Bemühen Sie sich daher um ein gründliches Verständnis! Betrachten Sie dazu auch Bild 4.

Die Klemmenspannung wird im äußeren Stromkreis vollständig verbraucht, der Spannungsabfall ist gleich der Klemmenspannung ($U_k = I \cdot R_a$).

Je nach der Größe von R_a stellt sich eine entsprechende Stromstärke ein, so daß diese Gleichheit immer gewahrt bleibt.

Die Bewegungsenergie, die von der Spannungsquelle hervorgebracht wird, ist um den Spannungsabfall U_1 größer als die Klemmenspannung U_k :

$$E = U_1 + U_k$$

$$E = I \cdot R_1 + I \cdot R_a = I (R_1 + R_a)$$

(5)

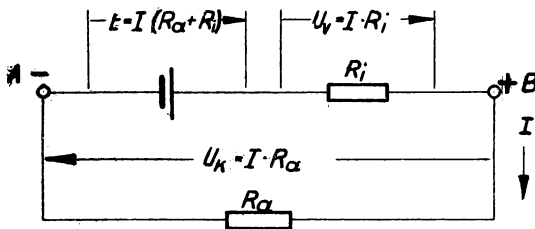


Bild 4* Grundstromkreis mit Gleichungen für die einzelnen Spannungen

Innerer und äußerer Widerstand zehren also die Urspannung der Spannungsquelle vollständig auf. Die Urspannung kann somit durch Summenbildung aus äußerem und innerem Spannungsabfall errechnet werden.

Anders ausgedrückt:

Im unverzweigten Stromkreis ist die Summe aller inneren und äußeren Spannungsabfälle gleich der Summe aller Urspannungen.

$$\sum E = \sum U$$

Dieser Zusammenhang ist Ihnen bereits aus Lbf. 1, Abschn. 1.2.2. bekannt.

Sehen Sie sich Formel (5) nochmals an. Sie erkennen, daß der innere Spannungsabfall nicht konstant ist. Er hängt von der Stromstärke I ab. Wovon hängt I ab? Wenn Urspannung E und der innere Widerstand R_1 einer Spannungsquelle gegeben sind, so ist nur noch ein Faktor entscheidend für die Stromstärke, nämlich R_a .

Wie der äußere Widerstand in einem gegebenen Stromkreis (E und $R_1 = \text{konst}$) die Stromstärke und somit die anteiligen Spannungsabfälle bestimmend beeinflusst, sollen Sie am folgenden Lehrbeispiel 1 kennenlernen.

Lehrbeispiel 1

Folgende Schaltelemente sind zu einem Grundstromkreis zusammengeschaltet: ein galvanisches Element als Spannungsquelle mit einer Urspannung $E = 4,2 \text{ V}$ und einem inneren Wider-

stand $R_1 = 6 \Omega$ und ein Belastungswiderstand R_a . Wie groß wird der Strom und die Klemmenspannung der Spannungsquelle, wenn der äußere Widerstand R_a folgende Werte annimmt:

- a) $R_a = \infty$ (d.h., Stromkreis ist unterbrochen.) Dieser Fall heißt Leerlauf, b) $R_a = 15 \Omega$, c) $R_a = 5 \Omega$, d) $R_a = 1 \Omega$, e) $R_a = 0$ (d.h., es ist kein Verbraucher im Stromkreis vorhanden, Klemmen nahezu widerstandslos überbrückt.) Dieser Fall heißt Kurzschluß.

Lösung:

$$\text{Aus } E = I (R_1 + R_a)$$

$$\text{folgt } I = \frac{E}{R_1 + R_a} \quad \text{zur Berechnung der Stromstärke}$$

$$\text{desgleichen aus } E = I \cdot R_1 + I \cdot R_a$$

$$\text{folgt } I \cdot R_a = E - I \cdot R_1$$

$$U_k = E - I \cdot R_1 \quad \text{zur Berechnung der Klemmenspannung}$$

$$\text{a) } R_a = \infty: I = \frac{E}{R_1 + R_a} = \frac{4,2 \text{ V}}{6 \Omega + \infty} = 0$$

$$U_k = E - I \cdot R_1 = 4,2 \text{ V} - 0 \cdot 6 \Omega = 4,2 \text{ V}$$

Merke: bei Leerlauf ist die Stromstärke gleich 0,
die Klemmenspannung ist gleich der Ursprungung.

$$\text{b) } R_a = 15 \Omega \quad I = \frac{E}{R_1 + R_a} = \frac{4,2 \text{ V}}{6 \Omega + 15 \Omega} = 0,2 \text{ A}$$

$$U_k = E - I \cdot R_1 = 4,2 \text{ V} - 0,2 \text{ A} \cdot 6 \Omega = 3,00 \text{ V}$$

$$\text{c) } R_a = 5 \Omega \quad I = \frac{E}{R_1 + R_a} = \frac{4,2 \text{ V}}{6 \Omega + 5 \Omega} = 0,38 \text{ A}$$

$$U_k = E - I \cdot R_1 = 4,2 \text{ V} - 0,38 \text{ A} \cdot 6 \Omega = 1,92 \text{ V}$$

$$d) R_a = 1\Omega \quad I = \frac{E}{R_1 + R_a} = \frac{4,2 \text{ V}}{6\Omega + 1\Omega} = 0,6 \text{ A}$$

$$U_k = E - I \cdot R_1 = 4,2 \text{ V} - 0,6 \text{ A} \cdot 6\Omega = 0,6 \text{ V}$$

$$e) R_a = 0 \quad I = \frac{E}{R_1 + R_a} = \frac{4,2 \text{ V}}{6\Omega + 0} = 0,7 \text{ A}$$

Kurzschluß

$$U_k = E - I \cdot R_1 = 4,2 \text{ V} - 0,7 \text{ A} \cdot 6\Omega = 0$$

Merke: Beim Kurzschluß ist als Widerstand nur R_1 vorhanden. Der von der Ursprungung angetriebene Strom erreicht seinen Höchstwert. Die gesamte Ursprungung fällt über dem inneren Widerstand ab, daher ist an den Klemmen keine Spannung vorhanden.

$$E = I \cdot R_1 = U_1$$

Der im Kurzschlußfall fließende Strom heißt Kurzschlußstrom

$$I_k = \frac{E}{R_1} \quad (6)$$

Zusammenfassend kann man das Verhalten der Größen im Grundstromkreis darstellen:

$$\begin{array}{lcl}
 R_a = \infty & \rightarrow & I = 0 \rightarrow U = E \\
 R_a & \begin{array}{l} \nearrow \text{steigend} \\ \searrow \text{fallend} \end{array} & \begin{array}{l} \rightarrow I \text{ fällt} \rightarrow U \text{ steigt} \\ \rightarrow I \text{ steigt} \rightarrow U \text{ fällt} \end{array} \\
 \text{endl. Wert} & & \\
 R_a = 0 & \rightarrow & I = I_k \rightarrow U = 0
 \end{array}$$

Merken Sie sich aus dieser Aufgabe noch den wichtigen Satz:

In einem unverzweigten Stromkreis (Reihenschaltung) verhalten sich die Spannungsabfälle wie die dazugehörigen Widerstände (großer Widerstand, großer Spannungsabfall und umgekehrt).

Soviel sei zu den Gesetzmäßigkeiten gesagt, die für das Verständnis des Grundstromkreises notwendig sind. Es treten aber in der Praxis die unverzweigten Stromkreise in den seltensten Fällen als Grundstromkreis auf. Meist besteht der Innen

nun bekannte Außenwiderstand R_a aus mehreren in Reihe geschalteten Widerständen. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises heißt dann selbstverständlich auch

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_a.$$

Da aber

$$R_a = R_1 + R_2 + R_3$$

folgt

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_1 + R_2 + R_3$$

Auch die Stromstärke hierbei zu ermitteln, dürfte Ihnen nicht schwer fallen, denn es gilt

$$I = \frac{E}{R_1 + R_a}$$

$$\text{also } I = \frac{E}{R_1 + R_1 + R_2 + R_3}$$

Die Ursprungsspannung wird auch nach den kennengelernten Gesetzen ermittelt, die allerdings eine Erweiterung erfahren.

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

$$E = U_1 + U_1 + U_2 + U_3$$

Zur Festigung der hier gewonnenen Erkenntnisse rechnen Sie selbstständig das folgende Lehrbeispiel durch:

Lehrbeispiel 2

Eine Spannungsquelle mit einer Ursprungsspannung $E = 60 \text{ V}$ und einem inneren Widerstand $R_1 = 0,6 \Omega$ ist mit drei in Reihe geschalteten Verbrauchsgeräten $R_1 = 8 \Omega$, $R_2 = 12 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$ verbunden. Temperatur = 20° C .

Berechnen Sie:

- den Gesamtwiderstand des Stromkreises,
- die Spannungsabfälle an den drei Verbrauchern,
- die Klemmenspannung der Spannungsquelle.

Lösung

a) der Gesamtwiderstand des Stromkreises

$$\begin{aligned} R_{\text{ges}} &= R_1 + R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 0,6 \Omega + 8 \Omega + 12 \Omega + 5 \Omega = 25,6 \Omega \\ &\quad \text{=====} \end{aligned}$$

b) Die Spannungsabfälle an den drei Verbrauchern

$$U_1 = I \cdot R_1$$

$$I = \frac{E}{R} = 2,34 \text{ A}$$

$$U_1 = 2,34 \text{ A} \cdot 8 \Omega = 18,72 \text{ V}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 2,34 \text{ A} \cdot 12 \Omega = 28,1 \text{ V}$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 2,34 \text{ A} \cdot 5 \Omega = 11,7 \text{ V}$$

c) Klemmenspannung der Spannungsquelle

$$\begin{aligned} U_k &= E - I \cdot R_1 = 60 \text{ V} - 2,34 \text{ A} \cdot 0,6 \Omega \\ &= 60 \text{ V} - 1,4 \text{ V} = 58,6 \text{ V} \\ &\quad \text{=====} \end{aligned}$$

Die Klemmenspannung kann man auch durch Weiterführung der Formel (5) errechnen:

$$E = U_1 + U_1 + U_2 + U_3$$

$$E - U_1 = U_1 + U_2 + U_3, \quad E - U_1 = U_k$$

$$\begin{aligned} U_k &= U_1 + U_2 + U_3 = 18,72 \text{ V} + 28,1 \text{ V} + 11,7 \text{ V} \\ &= 58,52 \text{ V} \\ &\quad \text{=====} \end{aligned}$$

Die Abweichung von 0,08 V ergibt sich aus Ablesefehlern beim Rechenschieber.

1.4.1.3. Der Leitungswiderstand

Bei der Betrachtung des unverzweigten Stromkreises gingen wir immer von der Annahme aus, daß der äußere Widerstand eines Stromkreises nur aus den einzelnen Verbrauchern besteht und der Widerstand der Leitung, die die einzelnen Verbraucher untereinander und mit der Spannungsquelle verbindet, vernachlässigbar klein sei. In der Praxis ist dies jedoch nicht immer der Fall, sondern der Widerstand langer Verbindungsleitungen ist oft sehr beträchtlich.

In Lbf. 1, 1.3.3. lernten Sie die Widerstandsbemessungsgleichung kennen

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

Wollen Sie diese Gleichung auf einen unverzweigten Stromkreis anwenden, dann müssen Sie beachten, daß er aus einer Hin- und Rückleitung zwischen der Spannungsquelle und dem Verbraucher sowie aus dem eigentlichen Verbraucher besteht. Wenn somit die Entfernung l zwischen Spannungsquelle und Verbraucher gegeben ist (Bild 5), dann lautet die Gleichung für den Leitungswiderstand R_L

$$R_L = \rho \cdot \frac{2 l}{A}$$

Die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis ist mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes zu berechnen, wobei man die Widerstände des Verbrauchers (R) und des Leiters (R_L) addiert:

$$I = \frac{U_k}{R_L + R}$$

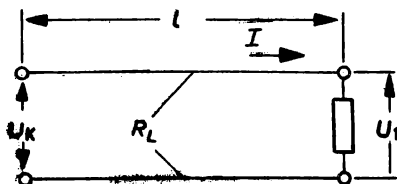


Bild 5: Leitungswiderstand im unverzweigten Stromkreis

Sie müssen stets beachten, daß jeder Verbraucher für ein ordnungsgemäßes Funktionieren eine ganz bestimmte Betriebsspannung oder Nennspannung U_N benötigt. Diese ist auf den Typenschildern der Geräte oder Maschinen vermerkt. Ist nun der Verbraucher sehr weit von der Spannungsquelle entfernt, so daß sich eine lange Zuleitung notwendig macht, so muß der Spannungsabfall U_L über dem Leitungswiderstand R_L berücksichtigt werden. Dies geschieht dadurch, daß der über R_L auftretende Spannungsabfall U_L zusätzlich von der Spannungsquelle geliefert werden muß, damit an den Klemmen des Verbrauchers tatsächlich noch U_N zur Verfügung steht. Somit ergibt sich die Klemmenspannung der Spannungsquelle

$$U_k = U_L + U_N \quad \text{oder}$$

$$U_k = I \cdot R_L + I \cdot R = I (R_L + R)$$

Was würde aber passieren, wenn am Ende unserer Leitung ein Verbraucher mit kleinerem Widerstand angeschlossen würden?

Das Ergebnis wäre ein größerer Stromfluß in der Zuleitung. Dies würde bei gleichem Leitungsquerschnitt zur Erhöhung der Stromdichte führen ($S = \frac{I}{A}$) und eine unzulässige Erwärmung der Leitung wäre die Folge. Deshalb wurde in den VDE-Vorschriften festgelegt, welche maximalen Stromstärken für bestimmte Drahtquerschnitte der einzelnen Leitermaterialien zulässig sind. Diese Festlegungen sind in den sog. Belastungstabellen für Leitungsquerschnitte zusammengestellt. In diesem Zusammenhang sei noch darauf hingewiesen, daß man den Spannungsabfall in der Zuleitung auch als Spannungsverlust U_v bezeichnet. Er darf bei Lichtanlagen 3 % und bei Kraftanlagen 5 % der Klemmenspannung nicht überschreiten.

Lehrbeispiel 3

In 500 m Entfernung von der Spannungsquelle mit der konstanten Klemmenspannung $U_k = 220 \text{ V}$ ist ein Verbraucher angeschlossen, der einen Strom von $I = 15 \text{ A}$ aufnimmt. Für diese Stromstärke wäre nach der Belastungstabelle ein Querschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ Cu genügend.

- Wie groß ist der Spannungsverlust in der Leitung?
- Wie verringert sich der Spannungsverlust, wenn ein Kupferdraht von 6 mm^2 gewählt wird?
- Berechnen Sie den notwendigen Leiterquerschnitt, wenn 3 % Spannungsverlust der Leitung maximal zugelassen sind?
- Wie groß ist die Nennspannung U_N (unmittelbar vor dem Verbraucher)?

Lösung:

- a) bei Leiterquerschnitt $1,5 \text{ mm}^2$ Cu

$$R_{L_1} = \frac{\rho \cdot \frac{2 \cdot l}{A}}{A} = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{2 \cdot 500 \text{ m}}{1,5 \text{ mm}^2} = 11,9 \Omega$$

$$U_{v_1} = U_{L_1} = I \cdot R_{L_1} = 15 \text{ A} \cdot 11,9 \Omega = 178,5 \text{ V}$$

$$U_N = U_k - U_{L_1} = 220 \text{ V} - 178,5 \text{ V} = 41,5 \text{ V}$$

b) bei Leiterquerschnitt $6 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$

$$R_{L_2} = \rho \cdot \frac{2 \text{ l}}{A} = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{2 \cdot 500 \text{ m}}{6 \text{ mm}^2} = 2,98 \Omega$$

$$U_{L_2} = I \cdot R_{L_2} = 15 \text{ A} \cdot 2,98 \Omega = \underline{\underline{44,7 \text{ V}}}$$

$$U_N = U_k - U_{L_2} = 220 \text{ V} - 44,7 \text{ V} = 175,3 \text{ V}$$

c) Leiterquerschnitt bei 3 % Spannungsabfall

$$R_L = \frac{\rho \cdot 2 \text{ l}}{A}$$

$$A = \frac{\rho \cdot 2 \text{ l}}{R_L}$$

$$R_L = \frac{U_L}{I}$$

$$U_L = \frac{U_k \cdot 3}{100}$$

$$R_L = \frac{U_k \cdot 3}{100 \cdot I}$$

$$A = \frac{\rho \cdot 2 \text{ l} \cdot 100 \cdot I}{U_k \cdot 3}$$

$$= \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 2 \cdot 500 \text{ m} \cdot 100 \cdot 15 \text{ A}}{220 \text{ V} \cdot 3} = 40,6 \text{ mm}^2$$

$$\approx \underline{\underline{40 \text{ mm}^2}}$$

Der Querschnitt des Leiters müßte $40 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ sein.

Zusammenfassung

Bei der Reihenschaltung von mehreren Verbrauchern ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R_a = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Der Grundstromkreis ist die einfachste Form eines unverzweigten Stromkreises. Er besteht aus einer Spannungsquelle und einem Verbraucher. In einem unverzweigten Stromkreis ist an jedem Punkt die Stromstärke gleich groß. Jede Spannungsquelle

hat einen Widerstand, den man als inneren Widerstand (R_i) bezeichnet im Gegensatz zum Widerstand des Verbrauchers, den man äußeren Widerstand (R_a) nennt. Die Summe aus innerem und äußerem Widerstand ist der Gesamt- oder Ersatzwiderstand des Stromkreises (R).

$$R = R_i + R_a$$

Den durch den inneren Widerstand der Spannungsquelle verursachten Spannungsabfall bezeichnet man als inneren Spannungsabfall

$$U_i = I \cdot R_i$$

im Gegensatz zum äußeren Spannungsabfall, der durch den äußeren Widerstand verursacht wird. Der äußere Spannungsabfall ist gleich der an den Klemmen der Spannungsquelle verfügbaren Spannung (Klemmenspannung U_k)

$$\begin{aligned} U_k &= E - I \cdot R_i \\ &= I \cdot R_a \end{aligned}$$

Im unverzweigten Stromkreis ist die Summe aller inneren und äußeren Spannungsabfälle gleich der Ursprungung E ; es verhalten sich dabei die Spannungsabfälle wie die dazugehörigen Widerstände.

$$\begin{aligned} E &= U_i + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \\ \frac{E}{R_{\text{ges}}} &= \frac{U_i}{R_i} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \frac{U_4}{R_4} \end{aligned}$$

Bei der Berechnung von unverzweigten Stromkreisen ist zu beachten, daß der Spannungsverlust U_v der Leitung für die doppelte Entfernung gerechnet werden muß, da die Leitung immer aus einer Hin- und Rückleitung besteht

$$R = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l}{A}$$

Wiederholungsfragen

1. Wie verhält sich die Stromstärke an den einzelnen Punkten des unverzweigten Stromkreises?
2. Welchen Einfluß hat der innere Widerstand auf die Klemmenspannung der Spannungsquelle?
3. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Spannungsabfällen und den Widerständen im unverzweigten Stromkreis?

Übungen

1. In einem Fernsprechkabel aus Kupfer haben zwei Adern von 0,9 mm Durchmesser gegeneinander Kurzschluß. Zur Fehlerortbestimmung mißt man am Kabelanfang zwischen ihnen einen Widerstand von $14,5 \Omega$ ($\rho = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$).
 - a) Wieviel Meter von der Meßstelle muß man aufgraben, wenn eine Temperatur von 20°C angenommen wird?
 - b) Um welche Strecke liegt der Fehlerort von dem angenommenen entfernt, wenn die mittlere Temperatur im Erdreich nur 12°C beträgt?
2. Die Leerlaufspannung (= Ursprungsspannung) einer Spannungsquelle beträgt 225 V. Bei Anschluß von 35 hintereinandergeschalteten Glühlampen von je 6 V, 0,5 A wird eine Klemmenspannung von 210 V gemessen. Zu berechnen sind:
 - a) Äußerer Widerstand des Stromkreises unter Vernachlässigung der Leitungsverluste,
 - b) auftretende Stromstärke,
 - c) innerer Widerstand der Spannungsquelle.
3. Aus welchem Material besteht eine 65 m lange und 3 mm starke Doppelleitung, wenn bei einer Klemmenspannung von 120 V und einer Belastung von 5 A 2,19 % der angelegten Spannung in der Zuleitung abfallen?

4. Eine Spannungsquelle mit $1,8 \Omega$ innerem Widerstand speist 2 in Reihe geschaltete Heizgeräte von 14 bzw. 18Ω . Zum Anschluß dient eine insgesamt 35 m lange Kupferleitung von $1,5$ mm Durchmesser (nur einfach rechnen). An der Spannungsquelle wird eine Klemmenspannung von 215 V gemessen.

Berechnen Sie:

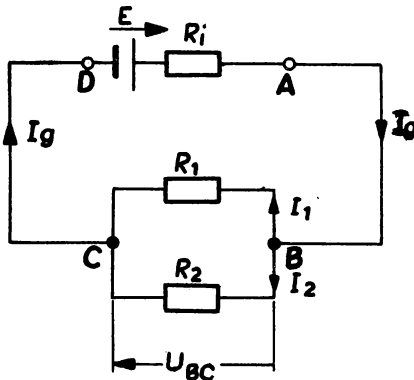
- Urspannung,
- Stromstärke,
- Spannungsverlust in der Leitung,
- Spannungen U_1 und U_2 an den beiden Geräten.

5. Wie groß ist der Kurzschlußstrom eines Bleiakkumulators mit einer Urspannung $E = 4,4$ V und einem inneren Widerstand von $0,005 \Omega$?

1.4.2. Verzweigte und vermaschte Stromkreise

1.4.2.1. Das 1. Kirchhoffsche Gesetz

Bei unseren bisherigen Betrachtungen durchfloß der gleiche Strom alle Schaltelemente; denn im unverzweigten Stromkreis waren alle Schaltelemente hintereinander geschaltet, das heißt, daß die Stromstärke an allen Stellen des unverzweigten Stromkreises gleich groß war. Wenn man aber die Widerstände



R_1 und R_2 so schaltet, wie Sie aus der Abbildung 6 erkennen, ist die Stromstärke nicht mehr an allen Punkten des Stromkreises gleich. Betrachten Sie den Stromfluß von der Spannungsquelle aus! - Es fließt von der Klemme A der Strom I_g (Gesamtstrom), der sich am Punkt B in den Strom I_1 und I_2 aufteilt. Die beiden Ströme I_1 und I_2 vereinigen sich wieder an dem Punkt C

Bild 6. Parallelschaltung

zu dem Strom I_g , der zur Spannungsquelle zurückfließt. Dabei ist zu beachten, daß der Strom I_g , der an der Klemme A die Spannungsquelle verließ, genauso groß ist wie der Strom I_g , der zur Spannungsquelle zurückfließt, denn es kann ja kein Strom verlorengehen bzw. zusätzlich entstehen. An dieser Feststellung erkennen Sie, daß die Summe der beiden Ströme I_1 und I_2 gleich dem Strom I_g sein muß.

Anders ausgedrückt heißt das: Die Summe der beiden abfließenden Ströme I_1 und I_2 ist gleich dem zufließenden Strom I_g . Es fließt von der Stromverzweigungsstelle, dem "Knotenpunkt", in einer Zeiteinheit die gleiche Elektrizitätsmenge weg, die ihr zugeführt wird. Das hat Robert Kirchhoff (deutscher Physiker, 1824 - 1887) bereits 1847 erkannt und in einem Gesetz, das man als Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität ansehen kann, zum Ausdruck gebracht:

Merken Sie sich dieses 1. Kirchhoffsche Gesetz, kurz die Knotenpunktregel genannt, in folgender Form:

In jedem Knotenpunkt ist die Summe aller zufließenden gleich der Summe aller abfließenden Ströme.

Als Gleichung geschrieben:

$$\sum I_{\text{zufl}} = \sum I_{\text{abfl}} \quad (7)$$

Dieses Gesetz, auf den Knotenpunkt nach Bild 7 angewendet, ergibt

$$I_2 + I_3 + I_5 = I_1 + I_4$$

1.4.2.2. Parallelschaltung von Widerständen

Die in Bild 6 dargestellte Schaltung von R_1 und R_2 heißt Parallelschaltung oder Nebeneinanderschaltung. Im Folgenden werden die Gesetzmäßigkeiten abgeleitet, die hierbei wirken.

Betrachten Sie noch einmal die Schaltung nach Bild 6! Zwischen den beiden Knotenpunkten B und C herrscht ein Spannungsabfall U_{BC} . Da das Ohmsche Gesetz auch für alle Stromverzweigungen gilt, kann man die Spannungsabfälle über den Wider-

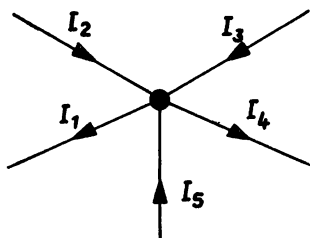


Bild 7: Knotenpunkt

stünden R_1 und R_2 wie folgt berechnen:

$$U_{BC} = I_1 \cdot R_1$$

$$U_{BC} = I_2 \cdot R_2$$

Subtrahieren wird die zweite Gleichung von der ersten:

$$I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = 0$$

$$\text{oder } I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

Aus dieser Umformung ergibt sich folgende Proportion:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

(8)

oder in Worten ausgedrückt:

Bei der Parallelschaltung von Widerständen verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die Widerstände.

Sie können sich das auch anders merken:

Bei der Parallelschaltung von zwei Widerständen fließt durch den kleineren Widerstand der größere Strom.

Wie Sie aus der Schaltung nach Bild 6 ersehen haben, teilt sich der Strom I_g in die Ströme I_1 und I_2 auf, die durch die Widerstände R_1 und R_2 fließen. Nun setzen Sie statt der Einzelwiderstände R_1 und R_2 einen Ersatzwiderstand R_{ers} in die Schaltung ein, der so bemessen sein muß, daß über ihm (also zwischen Knotenpunkten B und C) bei einem Strom I_g der gleiche Spannungsabfall U_{BC} auftritt wie über den parallelgeschalteten Widerständen R_1 und R_2 mit den Strömen I_1 und I_2 .

Wir setzen also folgendes voraus:

$$I_1 = \frac{U_{BC}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2}$$

$$I_g = \frac{U_{BC}}{R_{ers}}$$

Nach dem 1. Kirchhoffschen Gesetz ist

$$I_1 + I_2 = I_g$$

Es ist daher wie folgt einzusetzen:

$$\frac{U_{BC}}{R_1} + \frac{U_{BC}}{R_2} = \frac{U_{BC}}{R_{ers}}$$

Kürzen Sie diese Gleichung mit U_{BC} , dann ergibt sich

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{ers}}$$

oder bei Parallelschaltung von n Widerständen:

$$\boxed{\frac{1}{R_{ers}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (9)$$

Der reziproke Wert des Ersatzwiderstandes R_{ers} einer Parallelschaltung von Widerständen ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

Für die Berechnung von parallelgeschalteten Widerständen ist es einfacher, statt mit Widerständen (R) mit Leitwerten (G) zu rechnen. Wie Ihnen bereits aus Lbf. 1 bekannt ist, kann man für den reziproken Wert des Widerstands $\frac{1}{R}$ den Leitwert G einsetzen.

$$\boxed{G_{ers} = G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (10)$$

Bei der Parallelschaltung von Widerständen ist der Leitwert des Ersatzwiderstands gleich der Summe der Leitwerte der Einzelwiderstände.

Wir wollen noch einen Spezialfall betrachten! Es sind sehr häufig zwei parallelgeschaltete Widerstände zu berechnen. Der Ansatz nach der Gleichung (9) würde lauten:

$$\frac{1}{R_{ers}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Erzwingen Sie die rechte Seite der Gleichung auf den Hauptnenner

$$\frac{1}{R_{ers}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

und lösen Sie die Gleichung nach R_{ers} auf, dann erhalten Sie

$$R_{\text{ers}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

oder in Worten:

Der Ersatzwiderstand zweier parallelgeschalteter Widerstände ist gleich dem Quotienten aus dem Produkt der beiden Widerstände und deren Summe.

Lehrbeispiel 4

An eine Zimmersteckdose sind drei elektrische Geräte mit den Widerständen $R_1 = 1150 \, \Omega$, $R_2 = 900 \, \Omega$, $R_3 = 700 \, \Omega$ angeschlossen (Bild 8). Die Netzspannung sei 220 V.

- Durch welchen Widerstand können diese drei Geräte ersetzt werden?
- Wie groß sind der Gesamtstrom und die Teilströme?

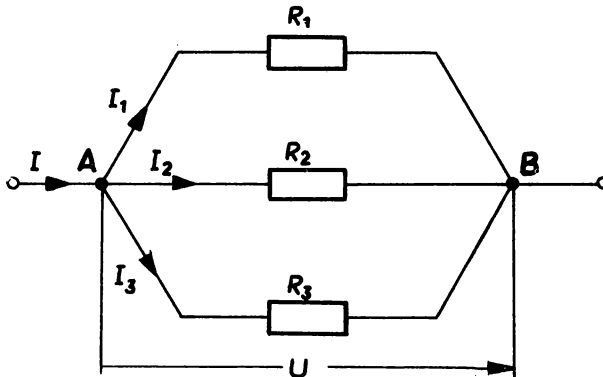


Bild 8

Lösung:

- Berechnen des Ersatzwiderstands

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1150 \, \Omega} + \frac{1}{900 \, \Omega} + \frac{1}{700 \, \Omega}$$

Wie Sie selbst sehen, ist es besser, mit Leitwerten zu rechnen:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{1150 \Omega} = 0,00087 \text{ S}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{900 \Omega} = 0,00111 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{700 \Omega} = 0,00143 \text{ S}$$

$$G_{\text{ers}} = G_1 + G_2 + G_3 = 0,00087 \text{ S} + 0,00111 \text{ S} + 0,00143 \text{ S} \\ = 0,00341 \text{ S}$$

$$R_{\text{ers}} = \frac{1}{G_{\text{ers}}} = \frac{1}{0,00341 \text{ S}} = 293 \Omega \quad \text{=====}$$

b) Berechnen der Gesamtstromstärke

$$I = \frac{U}{R_{\text{ers}}} = \frac{220 \text{ V}}{293 \Omega} = 0,750 \text{ A} \quad \text{=====}$$

vBerechnen der Teilströme in den einzelnen Widerständen

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220 \text{ V}}{1150 \Omega} = 0,191 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220 \text{ V}}{900 \Omega} = 0,245 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{220 \text{ V}}{700 \Omega} = 0,314 \text{ A}$$

Probe 0,750 A

Die Summe der Teilströme ist gleich der Gesamtstromstärke.

Aus dem Teilergebnis unter a) läßt sich eine Gesetzmäßigkeit ableiten, die für Parallelschaltungen in jedem Falle gilt:

Der Ersatzwiderstand ist stets kleiner als der kleinste Einzelwiderstand. Somit ist der kleinste Einzelwiderstand bestimmend für den Ersatzwiderstand.

1.4.2.3. Gegenüberstellung Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

Nachdem Sie über die Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen Bescheid wissen, sollen Sie die einzelnen Gesetzmäßigkeiten noch einmal zur Wiederholung miteinander vergleichen.

Für die Reihenschaltung von Widerständen gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

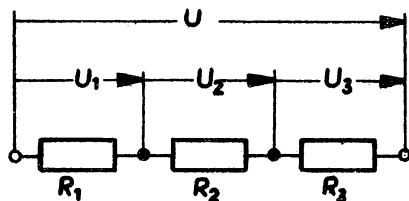


Bild 9: Reihenschaltung von Widerständen

1. Durch alle Widerstände fließt derselbe Strom.
2. Es verhalten sich die Spannungsabfälle wie die dazugehörigen Widerstände.

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$$

3. Der Gesamtwiderstand ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Für die Parallelschaltung von Widerständen gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

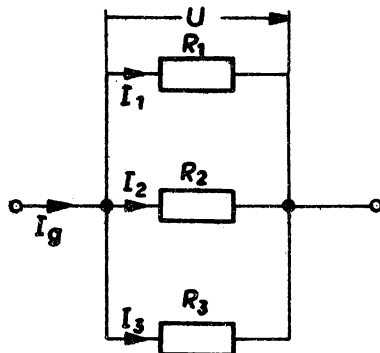


Bild 10: Parallelschaltung von Widerständen

1. Alle Widerstände liegen an derselben Spannung.
2. Die Teilströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände.
3. Der reziproke Wert des Gesamtwiderstands ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$G_{\text{ers}} = G_1 + \dots + G_n$$

1.4.2.4. Gemischte Schaltung von Widerständen

In den bisherigen Abschnitten haben Sie sich mit der Reihen- und der Parallelschaltung von Widerständen beschäftigt. In der Praxis kommt es jedoch vielfach vor, daß beide Schaltungsarten, die Reihen- und die Parallelschaltung, in einem Schaltungssystem zu finden sind. Man spricht in diesem Falle von der gemischten Schaltung. Denken Sie dabei an die Leitungen, die zwischen den parallelgeschalteten Verbrauchern liegen und die einen nicht zu vernachlässigenden Widerstand besitzen! Sie sehen an diesem Beispiel, daß die gemischte Schaltung in der Praxis wohl am häufigsten vorkommt.

Lehrbeispiel 5

Die Widerstände $R_1 = 6\Omega$, $R_2 = 9\Omega$, $R_3 = 15\Omega$, $R_4 = 9\Omega$, $R_5 = 7\Omega$, $R_6 = 25\Omega$, $R_7 = 22\Omega$, $R_8 = 37\Omega$, $R_9 = 19\Omega$ sind zu der im Bild 11a gezeichneten Schaltung zusammengefügt. Gesucht ist der Ersatzwiderstand zwischen den Punkten A und B (Bild 11a und b).

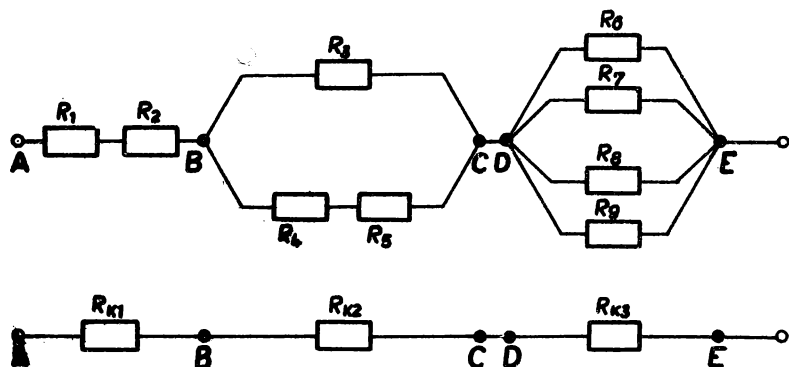


Bild 11a und b

Lösung:

Um den Ersatzwiderstand zwischen den Punkten A und E zu finden, müssen Sie zunächst die Teilersatzwiderstände zwischen den Knotenpunkten A und B, B und C sowie D und E berechnen.

Wir wollen diese drei Teilersatzwiderstände in der Berechnung mit den Indice k_1 , k_2 und k_3 bezeichnen:

$$R_{k_1} = R_1 + R_2 = 6\Omega + 9\Omega = 15\Omega$$

$$R_{k_2} = R_4 + R_5 = 9\Omega + 7\Omega = 16\Omega$$

$$R_{k_2} = \frac{R_3 \cdot R_{k_2}}{R_3 + R_{k_2}} = \frac{15\Omega \cdot 16\Omega}{15\Omega + 16\Omega} = 7,74\Omega$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{k_3}} &= \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} \\ &= \frac{1}{75\Omega} + \frac{1}{22\Omega} + \frac{1}{37\Omega} + \frac{1}{19\Omega} \\ &= 0,04 \text{ S} + 0,0455 \text{ S} + 0,027 \text{ S} + 0,0526 \text{ S} \end{aligned}$$

$$R_{k_3} = \frac{1}{0,1651 \text{ S}} = 6,06\Omega$$

$$R_{\text{ers}} = R_{k_1} + R_{k_2} + R_{k_3} = 15\Omega + 7,74\Omega + 6,06\Omega = 28,80\Omega$$

1.4.2.5. Anwendung der Reihen- und Parallelschaltung zur Erweiterung der Meßbereiche von Spannungs- und Strommessern

Wie Ihnen bereits bekannt ist, mißt man mit einem Spannungsmesser den Spannungsabfall zwischen zwei Punkten irgendeines Leiters. Sie wissen auch, daß die in der Praxis verwendeten Spannungsmesser strom"verbrauchende" Instrumente sind, d.h., es fließt durch sie ein Strom, dessen magnetische Kraftwirkung den Zeigerausschlag verursacht. Somit ist der Spannungsmesser ein in Volt geeichter Strommesser. Der höchste mit einem bestimmten Spannungsmesser zu messende Spannungsabfall U_g (Endausschlag des Zeigers) ist bestimmt durch den Widerstand des Instrumentes R_g und die Stromstärke I_g , die bei der Spannung U_g durch den Widerstand R_g fließen kann.

Es gilt also die Beziehung:

$$U_g = I_g \cdot R_g$$

Was würde geschehen, wenn dasselbe Instrument zur Messung eines größeren Spannungsabfalls verwendet würde, beispielsweise eines doppelt so großen Spannungsabfalles? Es würde, da der Widerstand R_g derselbe bleibt, die Stromstärke auf das Doppelte steigen. Das würden aber Widerstand und Spulen, die für I_g und nicht für $2 I_g$ bemessen sind, nicht aushalten. Nun ist es in der Praxis notwendig, oft sehr unterschiedliche Spannungen zu messen, die beispielsweise nur zu einem Teil in den Meßbereich eines Spannungsmessers fallen. Um nicht ständig das Meßgerät wechseln zu müssen, hat man die Möglichkeit geschaffen, den Meßbereich eines bestimmten Instrumentes zu verändern.

Soll z.B. ein Spannungsabfall U' gemessen werden, der n -mal so groß ist wie U_g , dann muß man, um I_g konstant zu halten, R_g n -mal so groß machen. Dies erreicht man durch Vorschalten eines Widerstandes (d.h. man schaltet einen Widerstand in Reihe zum Gerätewiderstand R_g).

Diesen Widerstand bezeichnet man als Vorschaltwiderstand R_v :

Wenn also $U' = n \cdot U_g$
dann muß $R' = n \cdot R_g$ der
Widerstand des Instrumentes
sein. Da $R' = R_v + R_g$,
folgt

$$R_v + R_g = n \cdot R_g$$

$$R_v = n \cdot R_g - R_g$$

$$R_v = R_g (n - 1)$$

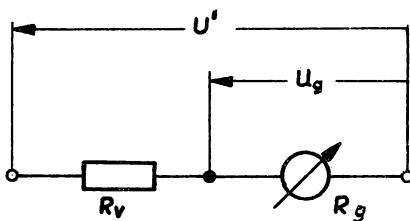


Bild 12: Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern

(11)

Nach dieser Formel ist der Vorschaltwiderstand zu berechnen, damit bei Erweiterung des Meßbereiches um das n -fache die

Stromstärke I_g erhalten bleibt. n ist der Erweiterungsfaktor und läßt sich ermitteln aus

$$n = \frac{U'}{U_g}$$

Lehrbeispiel 6

Welcher Vorschaltwiderstand ist für einen Spannungsmesser zu verwenden, dessen Meßbereich $U_g = 0 \dots 25 \text{ V}$ und dessen Widerstand $R_g = 2000 \Omega$ betragen, wenn damit Spannungen bis 250 V gemessen werden sollen?

Lösung:

gegeben: $U_g = 25 \text{ V}$ gesucht $R_v = ?$

$$U' = 250 \text{ V}$$

$$n = \frac{U'}{U_g} = 10$$

$$R_g = 2000 \Omega$$

$$\begin{aligned} R_v &= R_g (n - 1) \\ &= 2000 \Omega (10 - 1) \end{aligned}$$

$$R_v = 18000 \Omega$$

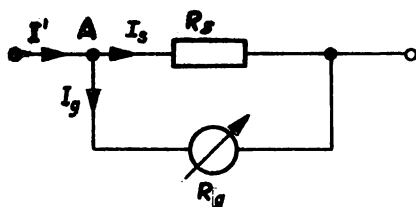
=====

Strommesser

Bei der Meßbereichserweiterung von Strommessern verhält es sich ähnlich wie bei den Spannungsmessern. Will man mit einem für die Stromstärke I_g geeichten Strommesser die Stromstärke $I' = n \cdot I_g$ messen, so müssen Vorkehrungen getroffen werden, damit wirklich nur I_g durch den Strommesser fließt.

Ihnen ist bekannt, daß Strommesser in den Strompfad hineingeschaltet werden, so daß der gesamte Strom durch das Instrument fließt. Um nur einen Teil von I' , nämlich I_g , durch das Instrument fließen zu lassen, muß parallel zum Instrument ein Widerstand geschaltet werden, der gewissermaßen als Weiche fungiert und den Anteil, der über I_g hinausgeht, um das Instrument herumleitet (Bild 13).

Diesen parallel zu schalten-
den Widerstand R_s , den man
auch Nebenwiderstand oder
Shunt (sprich: Schönnt) nennt,
gilt es nun für eine gewünschte
Erweiterung des Meßbereiches
zu berechnen.



Nach dem 1. Kirchhoffschen
Gesetz (Knotenpunktsatz) ist

Bild 13: Meßbereichserweiterung
von Strommessern

$$I' = I_g + I_s \quad \text{und da } I' = n \cdot I_g, \text{ folgt}$$

$$n \cdot I_g = I_g + I_s$$

$$\text{Dann ist } I_s = I_g \cdot n - I_g$$

$$\text{oder } I_s = I_g (n - 1)$$

Wie Sie bereits wissen, verhalten sich bei parallelgeschalteten Widerständen die Teilstromstärken in den einzelnen Zweigen umgekehrt wie die dazugehörigen Widerstände, also

$$\frac{I_s}{I_g} = \frac{R_g}{R_s}$$

$$\text{oder } \frac{I_g (n-1)}{I_g} = \frac{R_g}{R_s}$$

$$n - 1 = \frac{R_g}{R_s}$$

Der gesuchte, parallelzuschaltende Widerstand R_s bei der Erweiterung des Meßbereiches um das n -fache ergibt sich zu:

$$R_s = \frac{R_g}{n - 1}$$

(12)

Lehrbeispiel 7

Der Meßbereich eines Strommessers ($R_g = 6\Omega$ und $I_g = 6 \text{ mA}$) soll durch Verwendung eines Nebenwiderstandes auf $I' = 3 \text{ A}$ vergrößert werden. Wie groß muß der Nebenwiderstand R_s sein?

Lösung:

gegeben: $R_g = 6 \Omega$

gesucht $R_g = ?$

$$I_g = 6 \text{ mA}$$

$$I' = 3 \text{ A}$$

$$R_g = \frac{R_g}{n - 1}$$

$$n = \frac{I'}{I_g}$$

$$R_g = \frac{R_g}{\frac{I'}{I_g} - 1} = \frac{6 \Omega}{\frac{3 \text{ A}}{0,006 \text{ A}} - 1} = \frac{6 \Omega}{500 - 1} = 0,01202 \Omega$$

Zusammenfassung

Das 1. Kirchhoffsche Gesetz, auch Knotenpunktsatz genannt, lautet:

In jedem Knotenpunkt ist die Summe aller zufließenden gleich der Summe der abfließenden Ströme

$$\sum I_{\text{zufl}} = \sum I_{\text{abfl}}$$

Von mehreren parallelgeschalteten Widerständen ermittelt man den Ersatzwiderstand, indem man die reziproken Werte bzw. die Leitwerte der einzelnen Widerstände addiert:

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$G_{\text{ers}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

Für zwei parallelgeschaltete Widerstände gilt:

$$R_{\text{ers}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

In parallelgeschalteten Widerständen verhalten sich die Teil-

ströme umgekehrt wie die Widerstände:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

Soll mit einem Spannungsmesser des Meßbereiches U_g eine größere Spannung $U' = n \cdot U_g$ gemessen werden, muß man einen Vorwiderstand in Reihe mit dem Instrument schalten. Für die Bemessung des Vorwiderstandes gilt

$$R_v = R_g (n - 1)$$

Einen Strommesser mit dem Meßbereich I_g kann man zur Messung größerer Stromstärken $I' = n \cdot I_g$ benutzen, wenn ein Nebenwiderstand oder Shunt parallel zum Instrument geschaltet wird. Für die Bemessung des Nebenwiderstandes gilt

$$R_s = \frac{R_g}{n - 1}$$

Wiederholungsfragen

4. Wie verhalten sich die Teilströme zweier parallelgeschalteter Widerstände?
5. Welcher Vorteil bietet sich bei der Berechnung von parallelgeschalteten Schaltelementen, wenn man statt mit Widerständen mit Leitwerten rechnet?
6. Wie lautet das 1. Kirchhoffsche Gesetz?
7. Wie nennt man die Widerstände, die zur Meßbereichserweiterung von Strom- und Spannungsmessern dienen?

Übungen

6. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand zwischen den Punkten A und F der Schaltung nach Bild 14!

Die einzelnen Widerstände haben folgende Werte:

$$R_1 = 5\Omega, R_2 = 11\Omega, R_3 = 17\Omega, R_4 = 14\Omega, R_5 = 7\Omega, R_6 = 3\Omega.$$

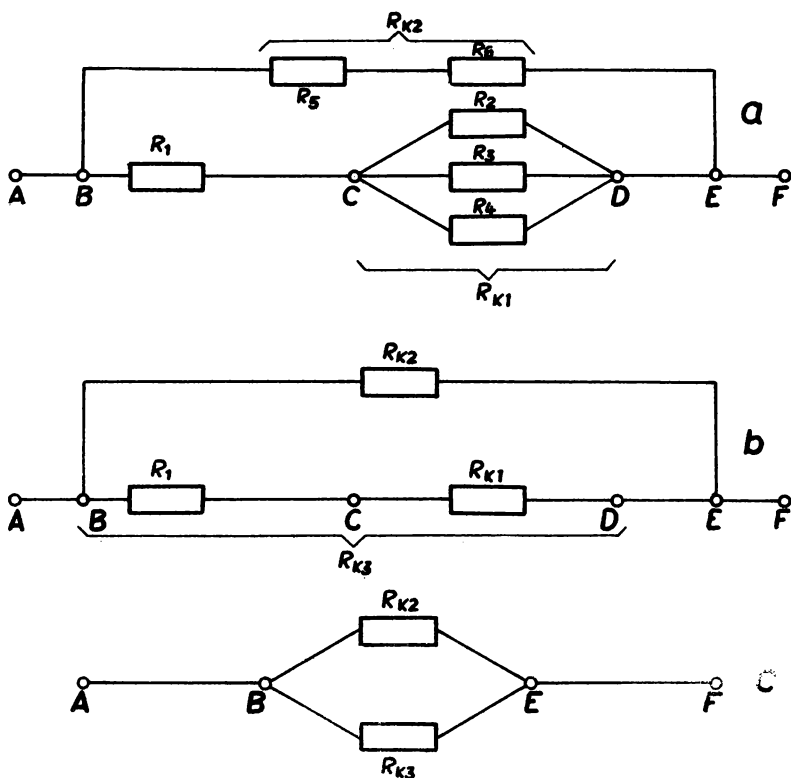


Bild 14

7. Berechnen Sie den Ersatzwiderstand der Schaltung nach Bild 15!

Die einzelnen Widerstände haben folgende Werte:

$$R_1 = 120\Omega, R_2 = 1\text{ k}\Omega, R_3 = 250\Omega, R_4 = 10\text{ k}\Omega, \\ R_5 = 100\Omega, R_6 = 1,5\text{ k}\Omega.$$

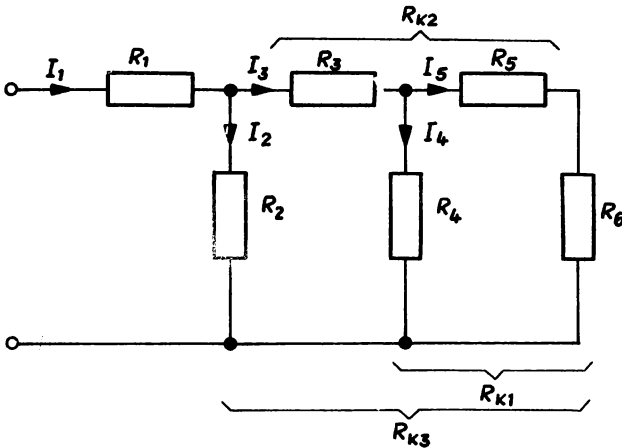


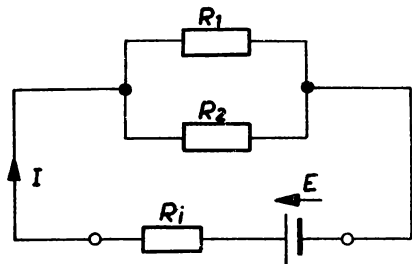
Bild 15

8. Berechnen Sie den Gesamtstrom I der Schaltung nach Bild 16!

Die Spannungsquelle hat eine
 Urspannung von $E = 6 \text{ V}$ und
 einen inneren Widerstand
 $R_i = 1,5 \Omega$. Die Widerstän-
 de haben folgende Werte:

$$R_1 = 15 \Omega$$

$$R_2 = 5 \Omega \quad \text{Bild 16}$$



9. Ein Drehspulinstrument hat bei Vollausschlag einen Meßbe-
 reich von $I_g = 6 \text{ mA}$ und $U_g = 100 \text{ mV}$.

Wie groß ist

- der Vorschaltwiderstand R_v , wenn der Spannungsmeßbe-
 reich auf $U' = 15 \text{ V}$, und
- der Parallelwiderstand R_g , wenn der Strommeßbereich
 auf $I' = 60 \text{ mA}$ erhöht werden soll?

1.4.2.6. Einfache Schaltungen von Spannungsquellen

Sie haben in den Abschnitten 1.4.1.2. bzw. 1.4.2.2. die Rei-
 henschaltung bzw. die Parallelschaltung von Widerständen

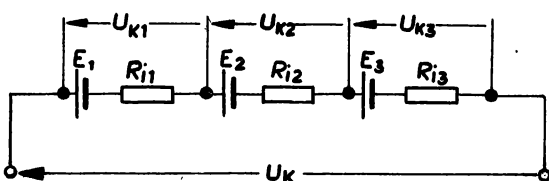
kennengelernt. Die Gemischtschaltung (1.4.2.4.) vereinigt beide Schaltungsmöglichkeiten in einer einzigen Schaltung. Die Möglichkeit der Reihen-, Parallel- und Gemischtschaltung besteht auch bei Spannungsquellen.

In diesem Abschnitt sollen nur die Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen behandelt werden. Bei der Ableitung der Gesetzmäßigkeiten, die über die dabei zustande kommenden Spannungen und Stromstärken Auskunft geben, sollen Sie vor allem den Grund für das Zusammenschalten in der einen oder anderen Form kennenlernen. Ferner sollen Sie entscheiden, wann die eine und wann die andere Schaltung zweckmäßig ist.

Die Reihenschaltung von Spannungsquellen

Wie Sie aus dem Abschnitt "Grundstromkreis" wissen, kennt man bei einer Spannungsquelle die Größen E und R_1 . Schaltet man mehrere Spannungsquellen hintereinander (Bild 17) - Reihenschaltung -, dann addieren sich deren Einzelurspannungen $E_1, E_2, E_3 \dots$ zu der Gesamturspannung E . Wenn Sie sich das Bild 17 ansehen, wird Ihnen das einleuchten:

Alle Einzelurspannungen (Antriebsenergien auf Elektronen)



wirken in derselben Richtung; eine Summierung liegt auf der Hand.

Die mathematische Formulierung der sich ergebenden Gesamturspannung lautet also

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad (13)$$

Bei n gleichen Spannungsquellen (gleiche Ursprung) kann man schreiben

$$E = n \cdot E_1$$

Diese Formel gilt selbstverständlich nur, wenn alle Einzelurspannungen in derselben Richtung wirken, also wenn jeweils

der Pluspol der einen Spannungsquelle mit dem Minuspol der nächsten verbunden wird. Ist dagegen eine der Spannungsquellen entgegengesetzt geschaltet, so wirkt ihre Antriebsenergie entgegengesetzt. Dies wird mit einem negativen Vorzeichen bei der Summenbildung berücksichtigt.

Ähnlich wie die Urspannungen verhalten sich die inneren Widerstände der einzelnen Spannungsquellen: Bei Reihenschaltung von Spannungsquellen addieren sich die inneren Widerstände zu einem inneren Gesamtwiderstand.

$$R_i = R_{i_1} + R_{i_2} + R_{i_3} + \dots + R_{i_n} \quad (14)$$

Bei n gleichen Spannungsquellen (gleicher innerer Widerstand) kann man schreiben

$$R_i = n \cdot R_{i_1}$$

Merken Sie sich:

Bei der Reihenschaltung von Spannungsquellen addieren sich die inneren Widerstände und Urspannungen (Vorzeichen beachten!) zu einem inneren Gesamtwiderstand und zu einer Gesamturspannung.

Wie Ihnen bereits bekannt ist, ermittelt man die Stromstärke im Grundstromkreis mittels des Ohmschen Gesetzes, indem man die Urspannung der Spannungsquelle durch die Summe aus innerem Widerstand der Spannungsquelle R_i und dem Widerstand des äußeren Stromkreises R_a dividiert.

$$I = \frac{E}{R_{\text{ges}}} = \frac{E}{R_i + R_a}$$

Sind in dem unverzweigten Stromkreis mehrere Spannungsquellen in Reihe geschaltet, dann gilt

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n}{R_{i_1} + R_{i_2} + R_{i_3} + \dots + R_{i_n} + R_a} \quad (15a)$$

oder bei n -gleichen Spannungsquellen

$$I = \frac{n \cdot E}{n \cdot R_i + R_a} \quad (15b)$$

Welche Stromstärke kann eine Anzahl in Reihe geschalteter Spannungsquellen abgeben?

Zu dieser Betrachtung stellen Sie sich eine sehr große Anzahl hintereinandergeschalteter Spannungsquellen vor. Dabei wird der innere Gesamtwiderstand der Spannungsquellen im Gegensatz zum äußeren Widerstand des Stromkreises so groß, daß der äußere Widerstand vernachlässigt werden kann. In diesem speziellen Fall ist dann die Stromstärke

$$I = \frac{n \cdot E_1}{n \cdot R_{i1}} = \frac{E_1}{R_{i1}}$$

n = sehr große Anzahl von gleichgearteten Spannungsquellen

Dieser spezielle Fall, den Sie bereits im Abschnitt über den Grundstromkreis kennenlernten, wird Kurzschluß genannt. Er tritt dann ein, wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises (R_a) gleich Null wird. Der dabei fließende Strom wird als Kurzschlußstrom (höchstmögliche Stromstärke) bezeichnet. Aus dieser Gleichung geht hervor, daß auch bei der Reihenschaltung von n gleichen Spannungsquellen der Kurzschlußstrom gleich dem einer Spannungsquelle ist.

Für die Anwendung der Reihenschaltung von Spannungsquellen können Sie sich daher folgendes merken:

Man wendet die Reihenschaltung von mehreren Spannungsquellen nur dann an, wenn eine hohe Klemmenspannung U_k und eine wesentlich geringere Stromstärke als die Kurzschlußstromstärke benötigt wird.

Die Klemmenspannung U_k der in Reihe geschalteten Spannungsquellen ist wie folgt zu ermitteln: Die Gleichung für die Klemmenspannung einer Spannungsquelle lautet

$$U_k = E - I \cdot R_i$$

Für n gleiche Spannungsquellen gilt analog

$$\begin{aligned} U_k &= n \cdot E - I \cdot n R_i \\ &= n (E - I R_{i1}) \end{aligned}$$

Lehrbeispiel 8

Vier hintereinandergeschaltete Elemente einer Taschenlampenbatterie haben eine Ursprungsspannung von je $E = 1,5 \text{ V}$ und einen inneren Widerstand von je $R_{i1} = 0,4 \Omega$.

Wie groß sind die gesamte Ursprungsspannung, Stromstärke und Klemmenspannung der Spannungsquelle bei Anschluß von 4 hintereinandergeschalteten Heizfäden von Rundfunkempfängerröhren mit je $R = 14 \Omega$?

gegeben: $E_1 = 1,5 \text{ V}$

$$R_{i1} = 0,4 \Omega$$

$$n_E = 4$$

$$R_{a1} = 14 \Omega$$

$$n_R = 4 \text{ (Reihenschaltung)}$$

gesucht: a) $E = ?$

b) $I = ?$

c) $U_k = ?$

Lösung:

$$\text{a) } E = n \cdot E_1 = 4 \cdot 1,5 \text{ V} = \underline{\underline{6 \text{ V}}}$$

$$\text{b) } I = \frac{E}{R}$$

$$R = R_i + R_a$$

$$R_i = n_E \cdot R_{i1}$$

$$R_a = n_R \cdot R_{a1}$$

$$\begin{aligned} R &= n_E \cdot R_{i1} + n_R \cdot R_{a1} \\ &= n (R_{i1} + R_{a1}) \end{aligned}$$

in diesem Fall ist

$$n_E = n_R = n = 4$$

$$I = \frac{E}{n (R_{i1} + R_{a1})} = \frac{6 \text{ V}}{4 (0,4 \Omega + 14 \Omega)} = \frac{6 \text{ V}}{57,6 \Omega} = \underline{\underline{0,104 \text{ A}}}$$

$$\text{c) } U_k = E - I \cdot R_i$$

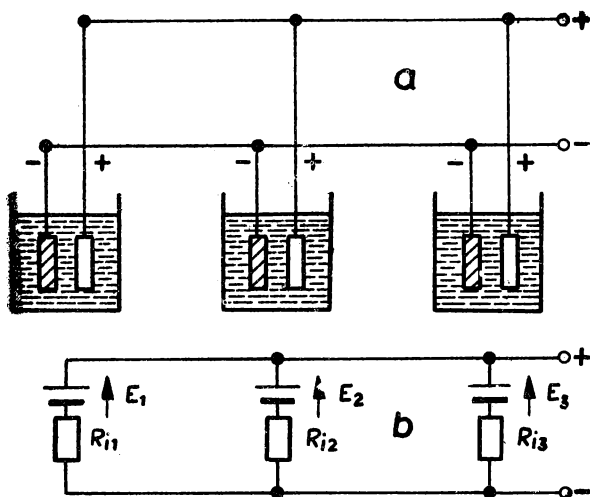
$$R_i = n \cdot R_{i1}$$

$$U_k = E - I \cdot n R_{i1}$$

$$\begin{aligned}
 U_k &= 6 \text{ V} - 0,104 \text{ A} \cdot 4 \cdot 0,4 \Omega \\
 &= 6 \text{ V} - 0,166 \text{ V} \\
 U_k &= 5,834 \text{ V} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

Parallelschaltung von Spannungsquellen

Bei der Reihenschaltung wurde jeweils der positive Pol der einen Spannungsquelle mit dem negativen Pol der nächsten verbunden. Bei der Parallelschaltung dagegen verbindet man jeweils alle gleichartigen Pole miteinander, also alle positiven sowie alle negativen.



Zum besseren Verständnis der hierbei zustande kommenden Spannungen und Ströme sollen folgende vereinfachte, der Veranschaulichung dienende Überlegungen herangezogen werden. Als Spannungsquellen sollen Akkumulatoren dienen.

Die Parallelschaltung von

Bild 18: Parallelschaltung von Spannungsquellen

Spannungsquellen (Bild 18) ist unter diesen Bedingungen gleichbedeutend mit einer "Verschmelzung" der Plattenoberflächen gleicher Polarität. Das Ergebnis dieser Überlegung ist eine Spannungsquelle, deren Plattengröße Sie sich aus denen der einzelnen parallelgeschalteten Spannungsquellen zusammengesetzt vorstellen.

Denken Sie nun an die Entstehung einer Urspannung durch Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie. Bei

großer Oberfläche der Elektroden kann eine größere Anzahl von Metallionen auf die Ionen des Elektrolyten einwirken oder umgekehrt. Dadurch können mehr Ladungsträger in der Zeiteinheit in Bewegung gesetzt werden als bei kleiner Oberfläche. Mehr Ladungsträger in der Zeiteinheit bedeutet eine größere Stromstärke ($I = \frac{Q}{t}$).

Der innere Widerstand R_i dieser durch die Parallelschaltung entstandenen "Gesamt"-Spannungsquelle verhält sich so, wie Sie das bei der Parallelschaltung von Widerständen kennengelernt haben; er wird kleiner als der kleinste Einzelinnenwiderstand.

Die verfügbare Urspannung definierten wir im Lehrbrief 1 als die Differenz zwischen den an den beiden Elektroden erzeugten Urspannungen. Dabei ist nicht die Größe, sondern der Werkstoff der beiden Elektroden sowie die Art des Elektrolyten entscheidend.

Da diese für die Höhe der Urspannung charakteristischen Bedingungen bei der Parallelschaltung nicht verändert werden, ist sie gleich der Urspannung einer Spannungsquelle (Bild 19).

Wir wollen bei der mathematischen Formulierung der bisherigen Er-

kenntnisse nur

Spannungsquellen mit gleicher Urspannung betrachten.

Für diese gilt also:

$$E_1 = E_2 = E_3 = \dots \text{ und } R_{i1} = R_{i2} = R_{i3} = \dots$$

Der Ersatzinnenwiderstand der m parallelgeschalteten Elemente ist entsprechend Gleichung (9)

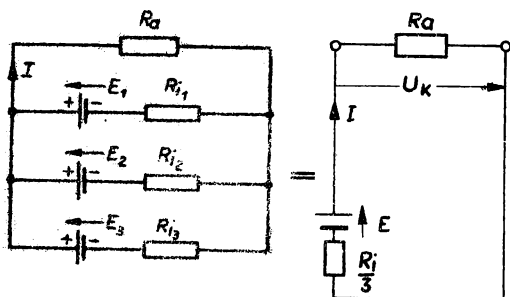


Bild 19: Ersatzschaltbild von parallelgeschalteten Spannungsquellen

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_{1\text{ers}}} &= \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \dots + \frac{1}{R_{1m}} \\ &= \frac{m}{R_{11}} \\ R_{1\text{ers}} &= \frac{R_{11}}{m}\end{aligned}$$

Die Klemmenspannung von m parallelgeschalteten Spannungsquellen mit gleich großem R_1 ergibt sich somit bei einem Stromfluß I zu

$$U_k = E - I \cdot \frac{R_{11}}{m} \quad (16)$$

Der Widerstand eines Stromkreises setzt sich aus dem inneren Widerstand R_1 und dem äußeren Widerstand R_a zusammen. Der Widerstand des Stromkreises mit m parallelgeschalteten Spannungsquellen und einem äußeren Widerstand R_a ist

$$R = \frac{R_{11}}{m} + R_a$$

Nach dem Ohmschen Gesetz können wir den Gesamtstrom in dem Stromkreis berechnen: $I = \frac{E}{R}$;

$$I = \frac{E}{\frac{R_{11}}{m} + R_a} \quad (17)$$

Sie merken sich also:

Die Ersatzurspannung von m gleichgearteten parallelgeschalteten Spannungsquellen ist ebensogroß wie die Urspannung einer einzelnen Spannungsquelle; der innere Widerstand beträgt jedoch nur $\frac{1}{m}$ des Einzelwertes.

Selbstverständlich gelten die Gesetze, die hier mit Hilfe der chemischen Spannungsquelle erklärt wurden, auch bei allen anderen Arten von Spannungsquellen. So kann man z.B. sehr leicht mit Hilfe des 1. Kirchhoffschen Gesetzes (Knotenpunkt-satz), der ja für alle Knotenpunkte gilt, nachweisen, daß bei

parallelgeschalteten Spannungsquellen eine Stromstärke entnommen wird, die gleich ist der Summe der von den einzelnen Spannungsquellen angetriebenen Stromstärken. Die Erläuterung an der chemischen Spannungsquelle sollte nur der besseren Veranschaulichung dienen.

Lehrbeispiel 9

Für einen Versuch stehen acht gleiche Elemente zur Verfügung, von denen jedes eine Urspannung von $E_1 = 1,5 \text{ V}$ und einen inneren Widerstand von $R_{i1} = 1,8 \Omega$ hat. Der äußere Widerstand des Stromkreises beträgt 2Ω . Welche Stromstärke fließt in dem Stromkreis und wie hoch ist die Klemmenspannung, wenn

- ein Element als Spannungsquelle dient?
- acht parallelgeschaltete Elemente als Spannungsquelle dienen?

Lösung:

gegeben: $E_1 = 1,5 \text{ V}$ gesucht: a) I und U_k bei $m = 1$
 $R_{i1} = 1,8 \Omega$ b) I und U_k bei $m = 8$
 $m = 8$
 $R_a = 2 \Omega$

$$\text{a) } I = \frac{E_1}{\frac{R_{i1}}{m} + R_a} = \frac{1,5 \text{ V}}{\frac{1,8 \Omega}{1} + 2 \Omega} = \frac{1,5 \text{ V}}{3,8 \Omega} = 0,395 \text{ A}$$

$$U_k = E_1 - I \cdot \frac{R_{i1}}{m} = 1,5 \text{ V} - 0,395 \text{ A} \cdot 1,8 \Omega \\ = 1,5 \text{ V} - 0,71 \text{ V} = 0,79 \text{ V}$$

$$\text{b) } I = \frac{E_1}{\frac{R_{i1}}{m} + R_a} = \frac{1,5 \text{ V}}{\frac{1,8 \Omega}{8} + 2 \Omega} = \frac{1,5 \text{ V}}{2,225 \Omega} = 0,674 \text{ A}$$

$$U_k = E_1 - I \cdot \frac{R_{i1}}{m} = 1,5 \text{ V} - 0,674 \text{ A} \cdot \frac{1,8 \Omega}{8} \\ = 1,5 \text{ V} - 0,150 \text{ V} = 1,350 \text{ V}$$

Wie Sie aus diesem Lehrbeispiel sehen, ist der innere Spannungsabfall bei Parallelschaltung der Spannungsquellen viel geringer als bei der Verwendung von einzelnen Elementen. Die Klemmenspannung U_k sinkt gegenüber der Urspannung = Leerlaufspannung E auch bei einem größeren Stromfluß I nicht so stark ab, weil der innere Widerstand der 8 parallelgeschalteten Spannungsquellen nur den achten Teil des inneren Widerstandes einer Spannungsquelle ausmacht.

Zum besseren Einprägen wollen wir noch einmal die charakteristischen Gleichungen der beiden Schaltungsarten gegenüberstellen:

Reihenschaltung

Parallelschaltung

von Elementen

Stromstärke I

Es gilt für die Stromstärke I :

Es gilt für die Stromstärke I :

$$I = \frac{n \cdot E}{nR_{i1} + R_a}$$

Dividiert man Zähler und Nenner durch n , dann folgt

$$I = \frac{E}{R_{i1} + \frac{R_a}{n}}$$

$$I = \frac{E}{\frac{R_{i1}}{m} + R_a}$$

Klemmenspannung U_k

$$U_k = n (E - I \cdot R_{i1})$$

$$U_k = E - I \cdot \frac{R_{i1}}{m}$$

Was sehen Sie aus dieser Gegenüberstellung?

Vergleichen Sie zuerst die Gleichung der Stromstärke bei Reihenschaltung von Elementen mit der Gleichung bei Parallelschaltung!

Bei der Gleichung der Stromstärke für die Reihenschaltung verringert sich mit wachsender Anzahl der Elemente der Ein-

fluß des äußeren Widerstandes R_a auf den Gesamtwiderstand des Stromkreises und damit auf die Stromstärke I . Man wendet daher die Reihenschaltung von Elementen nur dann an, wenn der äußere Widerstand des Stromkreises größer als der innere Widerstand der Spannungsquelle ist ($R_a > R_i$).

Bei der Gleichung der Stromstärke für die Parallelschaltung ist es gerade umgekehrt; Es verringert sich mit wachsender Anzahl m der Elemente der Einfluß des inneren Widerstandes auf den Gesamtwiderstand des Stromkreises und damit auf die Stromstärke I .

Die Parallelschaltung von Elementen wendet man dann an, wenn der innere Widerstand einer Spannungsquelle größer ist als der äußere Widerstand des Stromkreises ($R_i > R_a$).

Aus der Gleichung der Klemmenspannung U_k sind diese Aussagen nicht unmittelbar abzuleiten. Sie sehen aber aus ihr, daß bei der Reihenschaltung von Spannungsquellen der innere Spannungsabfall ($I \cdot nR_i$) größer ist als bei der Parallelschal-

tung ($I \cdot \frac{R_i}{m}$).

Sie wollen sich deshalb merken:

Man schaltet die Spannungsquellen in Reihe, wenn der Außenwiderstand größer ist als der Innenwiderstand; man schaltet sie parallel, wenn der Innenwiderstand größer ist als der Außenwiderstand des Stromkreises.

Lehrbeispiel 10

Für die Reihen- und die Parallelschaltung von 15 Spannungsquellen ist die Stromstärke zu berechnen bei einem äußeren Widerstand

$R_a = a) 25\Omega$; b) 15Ω ; c) $0,5\Omega$; d) $0,1\Omega$; e) 0 und
 $n = m = 15$,
 $E = 1,8 \text{ V}$, $R_i = 0,5\Omega$.

Lösung:

	Reihenschaltung	Parallelschaltung
	$I = \frac{E}{R_1 + \frac{R_a}{m}}$	$I = \frac{E}{\frac{R_1}{m} + R_a}$
a) $R_a = 25 \Omega$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{0,5 \Omega + \frac{25 \Omega}{15}}$ $= 0,831 \text{ A}$ $=====$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{\frac{0,5 \Omega}{15} + 25 \Omega}$ $= 0,072 \text{ A}$ $=====$
b) $R_a = 15 \Omega$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{0,5 \Omega + \frac{15 \Omega}{15}}$ $= 1,20 \text{ A}$ $=====$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{\frac{0,5 \Omega}{15} + 15 \Omega}$ $= 0,120 \text{ A}$ $=====$
c) $R_a = 0,5 \Omega$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{0,5 \Omega + \frac{0,5 \Omega}{15}}$ $= 3,375 \text{ A}$ $=====$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{\frac{0,5 \Omega}{15} + 0,5 \Omega}$ $= 3,375 \text{ A}$ $=====$
d) $R_a = 0,1 \Omega$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{0,5 \Omega + \frac{0,1 \Omega}{15}}$ $= 3,553 \text{ A}$ $=====$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{\frac{0,5 \Omega}{15} + 0,1 \Omega}$ $= 13,500 \text{ A}$ $=====$
e) $R_a = 0$ Kurzschluß	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{0,5 \Omega + \frac{0}{15}}$ $= 3,6 \text{ A}$ $=====$	$I = \frac{1,8 \text{ V}}{\frac{0,5 \Omega}{15} + 0}$ $= 54 \text{ A}$ $=====$

Vergleichen Sie die Lösungen des Lehrbeispielles mit unserem Merksatz!

Bei Fall a und b ist der äußere Widerstand R_a (25Ω und 15Ω) größer als der Innenwiderstand $R_1 = 0,5 \Omega$. Der Stromfluß bei Reihenschaltung der Elemente ist größer als bei der Parallelschaltung (Reihenschaltung ist günstiger).

Sind äußerer und innerer Widerstand gleich (Fall c), dann ist auch der Stromfluß bei Reihen- und Parallelschaltung gleich.

Im Fall d ist der Innenwiderstand ($R_i = 0,5\Omega$) größer als der Außenwiderstand ($R_a = 0,1\Omega$). Die Stromstärke bei der Parallelschaltung ($I = 13,5\text{ A}$) ist größer als bei der Reihenschaltung ($I = 3,56\text{ A}$). Durch die Ergebnisse des Lehrbeispiels finden Sie den aufgestellten Merksatz bestätigt.

Der Fall e tritt meist nur ungewollt auf und ist vor allem bei parallelgeschalteten Elementen mit Gefahren verbunden, weil sich infolge des großen Stromflusses die Verbindungsleitungen stark erhitzen und dadurch viele Brände verursachen. Parallelgeschaltete Elemente, die einen großen Stromfluß ermöglichen, sollten unbedingt abgesichert werden.

1.4.2.7. Das 2. Kirchhoffsche Gesetz (Maschensatz)

Bereits in der Erläuterung der zwei Spannungsformen (Lbf. 1, 1.2.2.) haben Sie gesehen, daß alle im Stromkreis wirkenden Urspannungen durch die Widerstände verbraucht werden. Wir hatten dort die Schlußfolgerung gezogen, daß im geschlossenen Leiterkreis die Antriebsenergie gleich ist dem Verbrauch der Antriebsenergie. Diese Tatsache beruht auf dem physikalischen Gesetz "actio ist gleich reactio" (Wirkung ist gleich Gegenwirkung). Aus diesem Naturgesetz, das an jener Stelle nicht weiter erwähnt wurde, leiteten wir das für die Elektrotechnik wichtige Gesetz

$$\boxed{\sum E = \sum U} \quad (18)$$

ab. Dabei wurde E als die ursächliche, den Strom bewirkende Größe und der Spannungsabfall U als die Gegenwirkung, als die vom Stromantrieb bewirkte Größe charakterisiert.

In Worten gefaßt lautet dieses Gesetz

■ In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle.

Es handelt sich dabei um das 2. Kirchhoffsche Gesetz, welches Sie schon im ersten Lehrbrief kennengelernt haben.

Da $U = I \cdot R$, gilt für das 2. Kirchhoffsche Gesetz auch folgende Schreibweise:

$$\boxed{\sum E = \sum I \cdot R} \quad (18b)$$

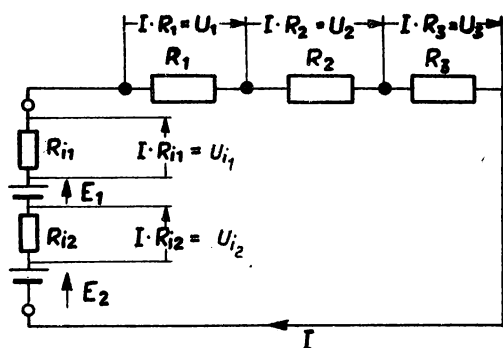


Bild 20: Schaltungsanordnung zum 2. Kirchhoffschen Gesetz

$$E_1 + E_2 = I \cdot R_{i1} + I \cdot R_{i2} + I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3$$

Dafür kann man auch schreiben:

$$E_1 + E_2 = U_{i1} + U_{i2} + U_1 + U_2 + U_3$$

Bei dieser Schaltung nach Bild 20 war das Aufstellen der Gleichung leicht, weil die Stromrichtung eindeutig gegeben

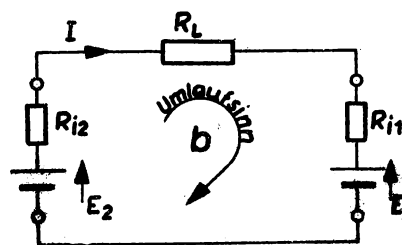
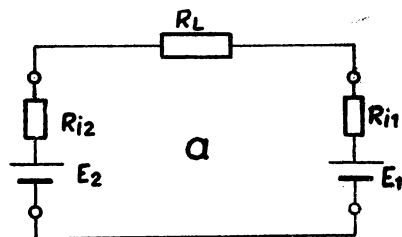


Bild 21 a u. b

Betrachten Sie dazu das Bild 20. Nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz gilt für diese Schaltung, wenn man die Spannungsabfälle in den Leitungen vernachlässigt, folgende Gleichung:

war. Enthält nun eine Schaltung mehrere Spannungsquellen, die nicht die gleiche Stromrichtung haben (Bild 21), dann sind vor der Anwendung des 2. Kirchhoffschen Gesetzes einige Vorarbeiten nötig:

1. Bei allen Spannungsquellen der Schaltung ist die Stromrichtung einzutragen (technische Stromrichtung: in der Spannungsquelle von - nach +).
2. Die Richtung der Ströme in den einzelnen Zweigen, in unserem Beispiel nur der

Strom I , wird willkürlich eingezeichnet.

3. Man legt willkürlich den Umlaufsinn der Schaltung bzw. der Masche fest. Alle eingezeichneten Urspannungen und Spannungsabfälle $I \cdot R$, deren Richtungen mit dem willkürlich festgelegten Umlaufsinn übereinstimmen, erhalten ein positives, die entgegengerichteten erhalten ein negatives Vorzeichen in den aufzustellenden Gleichungen.

Lehrbeispiel 11

Eine Batterie mit einer Urspannung von $E_1 = 88 \text{ V}$ und einem inneren Widerstand $R_{i1} = 0,060 \Omega$ soll durch einen Generator mit einer Urspannung $E_2 = 100 \text{ V}$ und einem inneren Widerstand $R_{i2} = 0,040 \Omega$ geladen werden. Die Leitung zwischen Generator und Batterie hat einen Widerstand von $R_L = 0,1 \Omega$ (siehe Schaltung nach Bild 21).

Es ist zu berechnen:

- die Ladestromstärke,
- der Spannungsabfall in der Batterie, im Generator und in der Leitung,
- die Klemmenspannung des Generators und der Batterie.

Lösung:

gegeben:	$E_1 = 88 \text{ V}$	gesucht: a) $I = ?$
	$R_{i1} = 0,06 \Omega$	b) U_1, U_2, U_L
	$E_2 = 100 \text{ V}$	c) U_{kG}, U_{kB}
	$R_{i2} = 0,04 \Omega$	
	$R_L = 0,1 \Omega$	

In Bild 21b sind bereits alle notwendigen Bezeichnungen eingetragen:

- die Stromrichtung der Spannungsquellen E_1 und E_2 ,
 - die Richtung des Stromes I ,
 - der Umlaufsinn zum Festlegen der positiven und der negativen Vorzeichen der Urspannungen und Spannungsabfälle.
- a) Ermittlung der Ladestromstärke

Das 2. Kirchhoffsche Gesetz lautet:

$$\sum E = \sum I \cdot R$$

Die Vorzeichen der Urspannungen und der Spannungsabfälle werden entsprechend dem Umlaufsinn festgelegt.

$$- E_1 + E_2 = I \cdot R_{i_1} + I \cdot R_{i_2} + I \cdot R_L$$

$$- E_1 + E_2 = I \cdot (R_{i_1} + R_{i_2} + R_L)$$

Für die Ladestromstärke ergibt sich:

$$\begin{aligned} I &= \frac{-E_1 + E_2}{R_{i_1} + R_{i_2} + R_L} \\ &= \frac{-88 \text{ V} + 100 \text{ V}}{0,060\Omega + 0,040\Omega + 0,1\Omega} = \frac{12 \text{ V}}{0,2\Omega} \\ &= 60 \text{ A} \\ &==== \end{aligned}$$

Da die errechnete Stromstärke ein positives Vorzeichen hat, stimmt sie mit der willkürlich festgelegten Stromrichtung überein. Würde sich ein negatives Vorzeichen ergeben, so wäre die willkürlich festgelegte Stromrichtung falsch gewählt und müßte umgekehrt werden. Rechnen Sie diese Teilaufgabe am Schluß noch einmal mit entgegengesetzter Stromrichtung (Bild 21b).

b) Berechnung des Spannungsabfalls in der Batterie, im Generator und in der Leitung

Spannungsabfall in der Batterie:

$$\begin{aligned} U_1 &= I \cdot R_{i_1} \\ &= 60 \text{ A} \cdot 0,060\Omega \\ &= 3,6 \text{ V} \\ &==== \end{aligned}$$

Spannungsabfall im Generator:

$$\begin{aligned} U_2 &= I \cdot R_{i_2} \\ &= 60 \text{ A} \cdot 0,040\Omega \\ &= 2,4 \text{ V} \\ &==== \end{aligned}$$

Spannungsabfall in der Leitung:

$$\begin{aligned}U_L &= I \cdot R_L \\&= 60 \text{ A} \cdot 0,1 \Omega \\&= 6 \text{ V} \\&===\end{aligned}$$

Zur Probe stellen Sie die Summe der Urspannungen der Summe der Spannungsabfälle gegenüber:

$$\begin{aligned}\sum E &= - E_1 + E_2 \\&= - 88 \text{ V} + 100 \text{ V} \\&= 12 \text{ V} \\ \sum U &= U_1 + U_2 + U_L \\&= 3,6 \text{ V} + 2,4 \text{ V} + 6 \text{ V} \\&= 12 \text{ V}\end{aligned}$$

Sie sehen, die Bedingung $\sum E = \sum U$ ist für unseren Stromkreis erfüllt.

c) Berechnung der Klemmenspannung des Generators und der Batterie

$$\begin{aligned}\text{Generator:} \quad U_{kG} &= E_2 - U_2 \\&= 100 \text{ V} - 2,4 \text{ V} \\&= 97,6 \text{ V} \\&=====\end{aligned}$$

Betrachten Sie noch einmal das Bild 21b! Beim Generator stimmen Urspannungsrichtung der Spannungsquelle und willkürlich festgelegte Stromrichtung, die sich durch die Berechnung als richtig erwiesen hat, überein. Bei der Batterie ist jedoch die Urspannung der Spannungsquelle der allgemeinen Stromrichtung entgegengerichtet. Damit in der Batterie der Ladestrom I fließen kann, muß die an der Batterie anliegende Spannung um $I \cdot R_{11}$ größer sein.

Als Klemmenspannung des Generators erhalten Sie, wie bereits bekannt ist,

$$\begin{aligned}U_{k2} &= E_2 - U_2 \\&= 97,6 \text{ V}\end{aligned}$$

Die beim Ladevorgang an den Klemmen der Batterie anliegende Spannung kann auch als Klemmenspannung der Batterie aufgefaßt werden. Da aber die Ursprungspannung der Batterie dem Umlaufsinn der Masche entgegengerichtet ist, erhält sie ein negatives Vorzeichen. Dadurch addieren sich hierbei die Spannungen:

$$\begin{aligned} U_{k_1} &= - E_1 - U_1 \\ &= - 88 \text{ V} - 3,6 \text{ V} \\ &= - 91,6 \text{ V} \\ &===== \end{aligned}$$

Sie können sich diesen Vorgang auch noch bildlich vorstellen: Die Bewegungsenergie des Generators E_2 hat den inneren Widerstand des Generators R_{i_2} und den Leitungswiderstand R_L zu überwinden, bis sie an die Klemmen der Batterie gelangt. In der Batterie muß noch deren innerer Widerstand R_{i_1} überwunden werden. Der Rest der Antriebsenergie des Generators ist gleich der Ursprungspannung der Batterie, die einander entgegengerichtet sind.

Wir können also schreiben:

$$E_2 - U_2 - U_L - U_1 = E_1$$

Zusammenfassung

Bei der Reihenschaltung von Spannungsquellen addieren sich die inneren Widerstände und Ursprungspannungen der einzelnen Spannungsquellen zu einem inneren Gesamtwiderstand und zu einer Gesamtursprungspannung

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \\ R_i &= R_{i_1} + R_{i_2} + R_{i_3} + \dots + R_{i_n} \end{aligned}$$

Bei m gleichartigen parallelgeschalteten Spannungsquellen ist die Ersatzursprungspannung ebenso groß wie die Ursprungspannung der einzelnen Spannungsquellen, der innere Widerstand ist jedoch nur $\frac{1}{m}$ des inneren Widerstandes einer Spannungsquelle. Die Stromstärke ergibt sich somit zu

$$I = \frac{E}{\frac{R_{i_1}}{m} + R_a}$$

Man schaltet die Spannungsquellen in Reihe, wenn der Außenwiderstand größer ist als der Innenwiderstand (große Klemmenspannung, geringe Stromstärke), man schaltet sie parallel, wenn der Innenwiderstand größer als der Außenwiderstand des Stromkreises ist.

Das 2. Kirchhoffsche Gesetz, auch Maschensatz genannt, lautet:

In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle:

$$\sum E = \sum U$$

Um den Maschensatz richtig anwenden zu können, sind einige Vorarbeiten notwendig:

1. Eintragen der Urspannungsrichtungen bei allen Spannungsquellen,
2. willkürliches Einzeichnen der Stromrichtungen in den einzelnen Zweigen,
3. willkürliches Festlegen des Umlaufsinnnes der Masche zum Bestimmen der Vorzeichen der einzelnen Spannungsabfälle.

Wiederholungsfragen

8. Wann wendet man die Reihen- und wann die Parallelschaltung von Spannungsquellen an?
9. Wie lautet das 2. Kirchhoffsche Gesetz?

Übung

10. Wieviel Taschenlampenbatterien (m) mit einer Urspannung $E_1 = 4,5 \text{ V}$ und einem inneren Widerstand $R_{11} = 1,1 \Omega$ müssen parallelgeschaltet werden, damit eine Stromstärke von $1,4 \text{ A}$ bei einem Außenwiderstand von $R_a = 3 \Omega$ gewährleistet ist?

1.5. Elektrische Energie und Leistung

1.5.1. Grundbeziehungen

In den folgenden Abschnitten wiederholen wir die Begriffe Energie und Leistung, die Sie bereits in Physik kennengelernt

haben. Energie und Leistung sind die Verbindungsglieder zwischen den einzelnen Zweigen der Naturwissenschaften, z.B. der Mechanik und der Wärmelhre, der Chemie und der Wärmelehre, der Elektrotechnik und der Mechanik usw.

Besonders interessieren uns jedoch die elektrische Energie und Leistung.

1.5.1.1. Allgemeines

Energie

Unter Energie versteht man die Fähigkeit eines physikalischen Systems (Körper, Molekül, Atom usw.), Arbeit zu verrichten. In der Physik haben Sie die Energie als potentielle und kinetische Energie kennengelernt. Aber die mechanische Energie ist nicht die einzige Erscheinungsform der Energie. Wir kennen z.B. noch die Wärmeenergie, die chemische Energie, die elektrische Energie, die Lichtenergie, die Atomenergie.

Durch Energieumwandlungen kommt man von einer Energieform zur anderen, z.B. von der elektrischen zur mechanischen Energie. Bei allen Energieumwandlungen gilt das Gesetz von der Erhaltung der Energie oder auch kurz der Energiesatz, der besagt, daß bei Energieumwandlungen keine Energie vernichtet oder neu geschaffen wird, mit anderen Worten, daß die Gesamtmenge der einzelnen Energien in einem abgeschlossenen System konstant bleibt.

Wenden wir den Energiesatz auf das Beispiel der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie an, dann gilt:

$$\text{Aufgewendete elektrische Energie} = \text{gewonnene mechanische Energie}$$

Die Energieumwandlungen treten im täglichen Leben in den verschiedensten Formen auf, die alle dem Energiesatz gehorchen, so z.B. beim Heizen des Ofens (= Umwandlung von chemischer Energie in Wärmeenergie), beim Fahrraddynamo (= Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie) usw.

Die Fähigkeit eines physikalischen Systems, Arbeit zu verrichten (Energie), wird immer nur dann sichtbar, wenn man

eine Energieform in eine andere umwandelt. Denken Sie dabei an ein Wasserkraftwerk: Umwandlung der potentiellen Energie (Energie der Lage) des Wassers in elektrische Energie. Weil die Energie gespeicherte Arbeit ist, was bei der Energieumwandlung sichtbar wird, kann man die Energie in den Einheiten der Arbeit messen.

Den Begriff der Arbeit kennen Sie bereits aus den Physiklehrbriefen. Die Arbeit ist definiert als das Produkt aus Kraft und Weg:

$$W = F \cdot s$$

Die Einheit der Arbeit in der Mechanik ist das Kilopondmeter (kpm).

Um die Größe der Arbeit bei den einzelnen Energieumwandlungen bestimmen zu können, lernen Sie das Rechnen mit den verschiedenen Arbeitseinheiten in den folgenden Abschnitten.

Sie wollen sich merken:

Unter Energie versteht man die Fähigkeit eines physikalischen Systems, Arbeit zu verrichten. Bei allen Energieänderungen gilt der Energiesatz: Bei Energieumwandlungen wird keine Energie vernichtet oder neu geschaffen. Die Energie wird mit den Einheiten der Arbeit gemessen; die Energie ist gespeicherte Arbeit.

Leistung

Bei den bisherigen Betrachtungen der Energie haben wir nicht die Zeitdauer der Energieumwandlung beachtet. Denken Sie z.B. an die Umwandlung von chemischer Energie in Wärmeenergie im Winter in Ihrem Stubenofen! Es ist nicht gleichgültig, ob Sie 50 kg Briketts für zwei Wochen oder zwei Tage einteilen müssen. Falls Sie zwei Wochen mit den 50 kg Briketts reichen müssen, ist die gewonnene Wärmeenergie und damit die Temperatur in Ihrem Zimmer bei weiter nicht so hoch, als wenn Sie die 50 kg innerhalb zweier Tage verheizen.

Bei der Energieumwandlung ist demnach noch eine andere Größe wichtig: die Leistung. Sie gibt an, welche Arbeit durch die

Energieumwandlung während einer bestimmten Zeitdauer verrichtet wird.

Die Leistung ist der Quotient aus der durch die Energieänderung freiwerdenden Arbeit und der Zeitdauer des Vorganges oder kurz die durch die Energieänderung freiwerdende Arbeit während einer Zeiteinheit.

$$\text{Leistung } P = \frac{\text{bei Energieumwandlung verrichtete Arbeit}}{\text{Zeitdauer der Arbeit}}$$

Der Begriff der Leistung ist Ihnen gleichfalls aus der Physik bekannt:

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{W}{t}$$

Die Einheit der Leistung in der Mechanik ist das Kilopondmeter pro Sekunde ($\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$).

1.5.1.2. Elektrische Energie und Leistung

a) Elektrische Energie

Sie haben sich im ersten Lehrbrief mit den Vorgängen im Stromkreis beschäftigt und lernten die Stromstärke, die beiden Spannungsformen - Urspannung und Spannungsabfall - und den Widerstand kennen. In diesem Abschnitt sollen Sie noch einmal diese Größen unter dem Blickwinkel der Energie betrachten.

In jeder Spannungsquelle gewinnt man die Antriebsenergie der Elektronen durch Umwandlung einer anderen Energieform in elektrische Energie. Denken Sie dabei an die Umwandlung von chemischer Energie bzw. Wärmeenergie oder mechanischer Energie in elektrische Energie, die Sie im ersten Lehrbrief als Spannungsquellen kennengelernt haben!

In der Spannungsquelle wird bei der Umwandlung einer anderen Energieform in elektrische Energie Arbeit verrichtet. Die Spannungsquelle wird dadurch zum Speicher von elektrischer Energie. Diese elektrische Energie wird wirksam, wenn an die Spannungsquelle irgendein Gerät angeschlossen, also der Stromkreis geschlossen wird. Dabei wird nämlich den Ladungsträgern Q von der Urspannung E Antriebsenergie übertragen, die sich

beim Umlauf im Stromkreis wieder in andere Energieformen umsetzt: in Wärmeenergie, magnetische Energie, mechanische Energie, chemische Energie, je nachdem, welcher Art die vom Strom durchflossenen Teile des Stromkreises sind. Es wird also im Stromkreis Arbeit verrichtet, die gleich ist der bei der Gewinnung der elektrischen Energie in der Spannungsquelle verrichteten Arbeit (denn es gilt der Satz von der Erhaltung der Energie).

In der Elektrotechnik interessiert nun, wie groß die Arbeit ist, die bei der Umwandlung der elektrischen Energie verrichtet wird, also die Arbeit, die die Ladungsträger Q auf Grund der ihnen von der Urspannung E mitgeteilten Antriebsenergie bei ihrem Umlauf durch den Stromkreis verrichten. Die den Ladungsträgern mitgeteilte Antriebsenergie ist jeweils nach einem vollen Umlauf durch den Stromkreis restlos aufgebraucht. Demnach ist die bei der Umwandlung der elektrischen Energie freiwerdende Arbeit (auch elektrische Arbeit oder Stromarbeit genannt) gleich dem Produkt aus Urspannung E und der Anzahl von in Bewegung gesetzter Ladungsträgern (oder Elektrizitätsmenge) Q .

$$W = E \cdot Q$$

$$Q = I \cdot t$$

$$W = E \cdot I \cdot t$$

(19)

Will man nun die in Wärmeenergie umgewandelte elektrische Energie in einem bestimmten Teil des Stromkreises, z.B. in einer im Stromkreis befindlichen Heizplatte, berechnen, dann muß man statt der Urspannung E den Spannungsabfall U zwischen den Klemmen der Heizplatte, in der die Verminderung der Antriebsenergie eingetreten ist, einsetzen. Denn der Spannungsabfall U zwischen zwei Punkten eines Stromkreises bedeutet ja Verminderung von elektrischer Energie und Gewinn von anderer Energie - in unserem Falle Wärmeenergie - zwischen diesen Punkten.

$$W = U \cdot I \cdot t$$

(20)

Diese Gleichung dient nicht nur zur Berechnung der Elektro-

energie oder der elektrischen Arbeit, die in Wärmeenergie umgesetzt, sondern allgemein zur Berechnung der Elektroenergie bzw. der elektrischen Arbeit, die in andere Energien (mechanische Energie, chemische Energie, Lichtenergie usw.) umgewandelt wurde.

Die Einheit der elektrischen Arbeit erhält man durch Einsetzen der Einheiten der einzelnen Größen - für die Urspannung E bzw. den Spannungsabfall U Volt, für die Stromstärke I Ampere und für die Zeit t Sekunden bzw. Stunden - in die Gleichung (20),

$$[W] = [U] \cdot [I] \cdot [t] = V \cdot A \cdot s$$

Statt Volt mal Ampere kann man zur Abkürzung auch Watt schreiben

$$1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$$

(James Watt, englischer Ingenieur, 1763 - 1819)

Demnach schreibt man besser als Einheit der elektrischen Arbeit

$$1 \text{ VAs} = 1 \text{ Ws}$$

Da eine Wattsekunde (Ws) eine sehr kleine Einheit ist, wurde zur Rechnungsvereinfachung als Untereinheit der elektrischen Arbeit die Kilowattstunde eingeführt:

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

Die Kilowattstunde ist Ihnen bestimmt schon bekannt, denn die Höhe der "Lichtrechnung" richtet sich nach den verbrauchten Kilowattstunden, die der Elektrizitätszähler in Ihrer Wohnung anzeigt. Der Elektrizitätszähler ist somit ein "Arbeitszähler", er zählt die in Ihrer Wohnung umgeformte elektrische Energie in Lichtenergie, Wärmeenergie und mechanische Energie.

Lehrbeispiel 12

In Ihrer Wohnung werden eine Stunde lang folgende Geräte (in Parallelschaltung!) betrieben:

1 Glühlampe mit einer Stromaufnahme	von 0,455 A,
1 Bügeleisen " " "	von 3,3 A,
1 Bratrohr im elektrischen Herd	von 6,35 A,
1 Kompressorkühlschrank	von 0,455 A.

Wieviel Kilowattstunden zeigt der Elektrizitätszähler an, wenn die Klemmenspannung 220 V beträgt? Wieviel kostet die benötigte elektrische Energie, wenn das Elektrizitätswerk für 1 kWh 0,08 DM berechnet?

Lösung:

gegeben: $I_1 = 0,455 \text{ A}$

$I_2 = 3,3 \text{ A}$

$I_3 = 6,35 \text{ A}$

$I_4 = 0,455 \text{ A}$

$U = 220 \text{ V}$

$t = 1 \text{ h}$

gesucht: $W = ?$

Preis = ?

Tarifpreis = $\frac{0,08 \text{ DM}}{\text{kWh}}$

Die verrichtete elektrische Arbeit ist

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Addiert man die Stromaufnahmen der einzelnen Geräte, so ergibt sich eine Gesamtstromstärke von 10,560 A.

$$\begin{aligned} W &= 220 \text{ V} \cdot 10,560 \text{ A} \cdot 1 \text{ h} \\ &= 2323,20 \text{ VAh} = 2 \text{ 323,20 Wh} \\ &= 2,323 \text{ kWh} \\ &===== \end{aligned}$$

Beachten Sie bei dieser Rechnung die Einheiten! Sie sehen, daß es nicht unbedingt notwendig ist, die üblichen Einheiten der einzelnen Größen einzusetzen (für t in Sekunden), wenn man gleichzeitig mit der Zahlenrechnung die Einheitenrechnung durchführt, wie Sie es in allen unseren Lehrbeispielen finden.

Preis der geleisteten elektrischen Arbeit:

$$2,323 \text{ kWh} \cdot 0,08 \frac{\text{DM}}{\text{kWh}} = 0,186 \text{ DM}$$

=====

Wollen Sie die verrichtete Arbeit bei Energieumwandlungen feststellen, dann kommt es vielfach vor, daß Sie elektrische Arbeit in mechanische Arbeit oder in Wärmemengen umrechnen müssen.

Nach DIN 1309 und durch das Gesetz vom 7. August 1924 sind folgende Äquivalente festgelegt worden:

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 860 \text{ kcal} \quad \text{und} \quad 1 \text{ kcal} \hat{=} 426,9 \text{ kpm} \quad (21)$$

Wie man die einzelnen Äquivalente ermittelt, ersehen Sie in den folgenden Abschnitten, vorerst sollen Sie rein mechanisch mit diesen Werten rechnen lernen.

Zur Erleichterung verweisen wir noch auf nachstehende Tabelle, aus der Sie alle gebräuchlichen Umrechnungszahlen der Arbeitseinheiten entnehmen können.

Tafel 1
Umrechnung der Wärmeeinheiten, der elektrischen und
der mechanischen Arbeitseinheiten

Arbeits- einheit	Ws(J)	kWh	cal	kcal	kpm	PSH
1 Ws (J)	1	$0,278 \cdot 10^{-6}$	0,239	$0,239 \cdot 10^{-3}$	0,102	$0,378 \cdot 10^{-6}$
1 kWh	$3,6 \cdot 10^6$	1	$0,86 \cdot 10^6$	860	$0,367 \cdot 10^6$	1,36
1 cal	4,187	$1,16 \cdot 10^{-6}$	1	10^{-3}	0,4269	$1,58 \cdot 10^{-6}$
1 kcal	4 187	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1000	1	426,9	$1,58 \cdot 10^{-3}$
1 kpm	9,81	$2,72 \cdot 10^{-6}$	2,34	$2,34 \cdot 10^{-3}$	1	$3,7 \cdot 10^{-6}$
1 PSh	$2,65 \cdot 10^{-6}$	0,736	$632 \cdot 10^3$	632	$0,27 \cdot 10^6$	1

Lehrbeispiel 13

Rechnen Sie mit Hilfe der Tafel 1 175 kpm in kcal und in kWh um!

Lösung:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kpm} &= 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ kcal} \\
 175 \text{ kpm} &= 175 \cdot 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ kcal} \\
 &= 409,50 \cdot 10^{-3} \text{ kcal} \\
 &= 0,4095 \text{ kcal} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kpm} &= 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} \\
 175 \text{ kpm} &= 175 \cdot 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} \\
 &= 476 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} \\
 &= 0,000476 \text{ kWh} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

b) Elektrische Leistung

Zur Beurteilung einer Maschine oder eines elektrischen Gerätes ist die Leistung von besonderer Bedeutung. Denken Sie z.B. an einen Elektromotor, der zum Antrieb einer Drehmaschine benötigt wird! Welche Größe ist für seine Bemessung maßgebend, die elektrische Arbeit, die er bis zu seiner Verschrottung in mechanische Arbeit umwandelt, oder die elektrische Leistung (elektrische Arbeit in einer Zeiteinheit, z.B. einer Stunde), die er in mechanische Leistung umformen kann? Es wird Ihnen einleuchten, daß nicht die elektrische Arbeit für die Bemessung von Motoren, Wärmegeräten, Glühlampen usw., sondern die Leistung von ausschlaggebender Bedeutung ist. Lesen Sie nochmals im Abschnitt 1.5.1.1. nach.

Die Leistung hatten wir dort definiert:

$$P = \frac{W}{t}$$

Im Abschnitt 1.5.1.2., Gleichung (19) erhielten wir für die elektrische Arbeit, die von der Spannungsquelle geliefert wird,

$$W = E \cdot I \cdot t$$

Die elektrische Leistung P der Spannungsquelle wäre demnach

$$P = \frac{W}{t} = \frac{E \cdot I \cdot t}{t} = E \cdot I \quad (22)$$

Um die Leistung eines an die Spannungsquelle angeschlossenen elektrischen Gerätes berechnen zu können, interessiert nicht die Leistung der Spannungsquelle, sondern die Leistung, die das Gerät aufnimmt. Man setzt daher statt der Urspannung E den Spannungsabfall U zwischen den Anschlußklemmen des Gerätes zur Berechnung ein; siehe Gleichung (20).

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Als elektrische Leistung erhält man:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I \quad (22a)$$

Diese Gleichung läßt sich noch umformen. Setzt man $I \cdot R$ an-
statt U in Gleichung (22a), dann erhält man für die elektrischen Leistung

$$P = I^2 \cdot R \quad (22b)$$

Setzt man in die Gleichung (22a) $\frac{U}{R}$ statt I , dann kann man für die elektrische Leistung schreiben:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (22c)$$

Die Einheit der elektrischen Leistung erhält man durch Einsetzen der Einheiten der einzelnen Größen in die Gleichung (22a)

$$[P] = [U] \cdot [I] = V \cdot A = VA$$

Wie Ihnen bereits bekannt ist, kann man statt

$$1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$$

setzen.

Das Watt ist die Einheit der elektrischen Leistung.

Zur Rechnungsvereinfachung hat man Untereinheiten festgelegt:

$$1 \text{ Milliwatt} = 1 \text{ mW} = \frac{1}{1000} \text{ W} = 10^{-3} \text{ W}$$

$$1 \text{ Mikrowatt} = 1 \mu\text{W} = \frac{1}{1000} \text{ mW} = 10^{-6} \text{ W}$$

$$1 \text{ Kilowatt} = 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ Megawatt} = 1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} = 10^6 \text{ W}$$

Bereits bei der Behandlung der elektrischen Energie machten wir Sie darauf aufmerksam, daß es notwendig ist, bei Energieumwandlungen elektrische Arbeit z.B. in Wärmearbeit oder mechanische Arbeit umzurechnen. Ähnlich verhält es sich auch mit der elektrischen Leistung z.B. eines elektrischen Ofens, wobei elektrische Leistung in Wärmeleistung umgerechnet werden muß. Zur Erleichterung der Umrechnung der einzelnen Leistungseinheiten geben wir Ihnen nachfolgende Tabelle:

Tafel 2
Umrechnung von Leistungseinheiten

Leistungs- einheiten	W	kW	$\frac{\text{kcal}}{\text{s}}$	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	PS
1 W	1	10^{-3}	$0,239 \cdot 10^{-3}$	0,102	$1,36 \cdot 10^{-3}$
1 kW	1000	1	0,239	102	1,36
1 $\frac{\text{kcal}}{\text{s}}$	4 187	4,187	1	426,9	5,7
1 $\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	1	$13,3 \cdot 10^{-3}$
1 PS	736	0,736	0,1755	75	1

Lehrbeispiel 14

Nach einem 1 km von der Spannungsquelle entfernten Punkt soll eine Leistung von 5 kW übertragen werden. In der Leitung dürfen sich 5 % der übertragenen Leistung in Wärme umwandeln (Leistungsverlust). Welchen Querschnitt muß die Kupferleitung erhalten, wenn die Leistung mit folgenden Spannungen übertragen wird:

a) 220 V

b) 6 kV

Lösung:

gegeben:

a) $U = 220 \text{ V}$

b) $U = 6000 \text{ V}$

$l = 2 \cdot 1000 \text{ m}$

$P = 5000 \text{ W}$

$P_v = 5 \% \text{ von } 5000 \text{ W}$

gesucht:

a) A bei 220 V

b) A bei 6000 V

a) bei 220 V

$$A = \frac{P \cdot 2 \cdot l}{R}$$

$$R = \frac{U_v^2}{P_v} \quad (\text{Gleichung 22e})$$

$$U_v^2 = \frac{P_v^2}{I^2} \quad (\text{Gleichung 22a})$$

$$I^2 = \frac{P_v^2}{U_v^2}$$

$$U_v^2 = \frac{P_v^2 \cdot U^2}{P^2}$$

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

$$A = \frac{P \cdot 2 \cdot l \cdot P^2}{P_v \cdot U^2}$$

$$= \frac{0,01786 \, \Omega \, \text{mm}^2 \cdot 2 \cdot 1000 \, \text{m} \cdot 5000^2 \, \text{W}^2}{\text{m} \cdot 0,05 \cdot 5000 \, \text{W} \cdot 220^2 \cdot \text{V}^2}$$

$$= \frac{1,786 \cdot 10^{-2} \, \Omega \, \text{mm}^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \, \text{m} \cdot 25 \cdot 10^6 \, \text{W}^2}{\text{m} \cdot 250 \, \text{W} \cdot 48,4 \cdot 10^3 \, \text{V}^2}$$

Einheitenprobe:

$$\frac{\Omega \, \text{mm}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{W} \cdot \text{W}}{\text{m} \cdot \text{W} \cdot \text{V} \cdot \text{V}} = \frac{1 \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{W}}{\text{A} \cdot \text{V}} = \text{mm}^2$$

$$A = 73,6 \, \text{mm}^2$$

=====

b) bei 6000 V (Ableitung wie unter a)

$$A = \frac{0,01786 \, \Omega \, \text{mm}^2 \cdot 2 \cdot 1000 \, \text{m} \cdot 5000^2 \, \text{W}^2}{\text{m} \cdot 0,05 \cdot 5000 \, \text{W} \cdot 6000^2 \, \text{V}^2}$$

$$= \frac{1,786 \cdot 10^{-2} \, \Omega \, \text{mm}^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \, \text{m} \cdot 25 \cdot 10^6 \, \text{W}^2}{\text{m} \cdot 250 \, \text{W} \cdot 36 \cdot 10^6 \, \text{V}^2}$$

$$A = 0,099 \, \text{mm}^2 \approx 0,1 \, \text{mm}^2$$

=====

c) Wirkungsgrad

Nach dem Energiesatz wird bei Energieumwandlungen keine Energie vernichtet oder neu geschaffen, die Gesamtmenge der einzelnen Energien bleibt in einem abgeschlossenen System konstant. Wie Ihnen aus der Physik bekannt ist, zeigen sich bei allen Energieumwandlungen unerwünschte Begleiterscheinungen. Soll z.B. in einer Glühlampe elektrische Energie in Lichtenergie umgeformt werden, tritt als unerwünschte Begleiterscheinung gleichzeitig eine Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie auf. Es ist also praktisch unmöglich, in der Glühlampe elektrische Energie nur in Lichtenergie umzuformen. Diese Feststellung läßt sich verallgemeinern: Es ist ausgeschlossen, eine Energieform in nur eine andere Energieform umzuwandeln. Bei jeder Energieveränderung erfolgt eine Umwandlung auch in nicht gewünschte Energieformen. Diese bezeichnet man als Verlust bei der Energieumwandlung.

Sie finden deshalb auf dem Typenschild von manchen Geräten, in denen Energieänderungen stattfinden, den sogenannten Wirkungsgrad η (Eta). Er gibt das Verhältnis zwischen nutzbarer Energie zur aufgewendeten Energie an:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{nutzbare Energie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$

Beträgt der Wirkungsgrad η z.B. der Glühlampe 0,02, so bedeutet das, daß nur 2 % der elektrischen Energie in Lichtenergie umgesetzt werden.

Da die einzelnen Maschinen und Geräte aber nicht nach Arbeitseinheiten, sondern nach Leistungseinheiten bemessen sind, ist es für die Rechnung besser, wenn der Wirkungsgrad mit Leistungsgrößen berechnet wird, was selbstverständlich zum gleichen Ergebnis führt.

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}}$$

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

(23a)

oder in Prozent ausgedrückt:

$$\eta \% = \frac{P_{ab} \cdot 100}{P_{zu}}$$

(23b)

Dabei ist zu beachten, daß die Einheit der zugeführten und der abgeführten Leistung in jedem Falle die gleiche sein muß!

Lehrbeispiel 15

Auf dem Typenschild eines Gleichstrommotors sind folgende

Daten angegeben: Spannung 220 V

Strom 186 A

abgegebene Leistung 50 PS

Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Motors!

Lösung:

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

$$P_{ab} = 50 \text{ PS} \cdot 0,736 \frac{\text{kW}}{\text{PS}} = 36,8 \text{ kW}$$

$$P_{zu} = U \cdot I$$

$$= 220 \text{ V} \cdot 186 \text{ A} = 40920 \text{ W}$$

$$= 40,920 \text{ kW}$$

$$= \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{36,8 \text{ kW}}{40,920 \text{ kW}}$$

$$= 0,9$$

===

Der Wirkungsgrad von 0,9 besagt, daß 90 % der zugeführten elektrischen Energie im Motor in mechanische Energie umgesetzt werden.

Lehrbeispiel 16

Welche Wärmemenge kann ein elektrischer Tauchsieder von 1000 W Leistung und einem Wirkungsgrad $\eta = 0,95$ in 2 Stunden erzeugen?

Lösung:

gegeben: $P_{zu} = 1 \text{ kW}$

$$\eta = 0,95$$

$$t = 2 \text{ h}$$

gesucht: die geleistete

Arbeit W in Wärme-
einheiten:

$$\begin{aligned}
 W &= P_{zu} \cdot t \cdot \eta \\
 &= 1 \text{ kW} \cdot 2 \text{ h} \cdot 0,95 \\
 &= 1,9 \text{ kWh} \\
 \text{Laut Tabelle ist } 1 \text{ kWh} &= 860 \text{ kcal} \\
 W &= 1,9 \text{ kWh} \cdot 860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}} \\
 &= 1634 \text{ kcal} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

Zusammenfassung

Unter Energie versteht man die Fähigkeit eines physikalischen Systems (Körper, Molekül, Atom usw.), Arbeit zu verrichten. Alle Energieänderungen unterliegen dem Energiesatz: Bei Energieumwandlungen bleibt in einem abgeschlossenen System die Gesamtmenge der einzelnen Energien konstant. Die Energie wird mit den Einheiten der Arbeit gemessen.

Als Leistung bezeichnet man die durch die Energieumwandlung freiwerdende Arbeit während einer Zeiteinheit.

$$\text{Leistung } P = \frac{\text{bei Energieumwandlung verrichtete Arbeit}}{\text{Zeitdauer der Arbeit}}$$

Bei der elektrischen Energie unterscheidet man zwischen

1. der elektrischen Energie der Spannungsquelle und
2. der elektrischen Energie im Stromkreis (Spannungsabfallstrecken).

Die elektrische Energie (= elektrisches Arbeitsvermögen der Spannungsquelle) ist der Urspannung E und der Elektrizitätsmenge Q direkt proportional.

$$W = E \cdot Q = E \cdot I \cdot t$$

Die elektrische Energie im Stromkreis (= elektrische Arbeit) ist dem Spannungsabfall zwischen den Klemmen des Verbrauchers und der durch den Verbraucher fließenden Elektrizitätsmenge Q direkt proportional:

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t$$

Die Einheit der elektrischen Energie ist die Wattsekunde (Ws). Meist wird jedoch mit der Untereinheit der elektrischen Arbeit, der Kilowattstunde, gerechnet:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Wh}$$

Zur Umrechnung der einzelnen Energieeinheiten sind Äquivalente festgelegt worden, die sich aus dem Joule'schen Gesetz ergeben:

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 860 \text{ kcal} \quad \text{und} \quad 1 \text{ kcal} \hat{=} 426,9 \text{ kpm}$$

Unter der elektrischen Leistung P versteht man das Produkt aus Spannung U und Stromstärke I .

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \\ &= I^2 \cdot R \\ &= \frac{U^2}{R} \end{aligned}$$

Die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt. Untereinheiten der elektrischen Leistung: Milliwatt, Mikrowatt, Kilowatt und Megawatt.

Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis zwischen abgegebener und zugeführter Leistung an

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

oder in Prozent ausgedrückt

$$\eta = \frac{P_{ab} \cdot 100}{P_{zu}}$$

Wiederholungsfragen

10. Wie lautet der Energiesatz?
11. In welchen Einheiten mißt man die Energie?
12. Wie leitet man die Leistung von der Energie ab?
13. Was verstehen Sie unter dem Wirkungsgrad?
14. Zählt der Elektrizitätszähler in Ihrer Wohnung elektrische Arbeit oder Leistung?

Übungen

11. Welche Leistung nimmt eine Glühlampe bei 220 V und 0,91 A auf?
12. Welche Leistung verbraucht eine Lichtbogenschweißmaschine bei 30 V Spannung und einer Stromstärke von 220 A?
13. Eine 250-W-Projektionslampe für 125 V wird über einen

Vorschaltwiderstand mit einer Netzspannung von 220 V gespeist. Welche Leistung P_v verbraucht der Vorschaltwiderstand?

14. Welche Leistung geht infolge des inneren Widerstandes eines Generators von $1,8 \Omega$ verloren? Die Klemmenspannung beträgt $U = 125 \text{ V}$ und die Urspannung $E = 138 \text{ V}$.
15. Welche Leistung in kW muß ein Motor aufnehmen, der eine Pumpe von 10 PS antreiben soll, wenn der Wirkungsgrad $\eta = 85 \%$ beträgt?
16. Auf dem Typenschild eines Zählers ist vermerkt:
1800 Ankerumdrehungen = 1 kWh. Welche Leistung hat eine Kochplatte, wenn in 1 Minute 42 Umdrehungen gezählt werden?

1.5.2. Umformung elektrischer Energie in Wärmeenergie und umgekehrt

1.5.2.1. Grundbeziehungen

Beim Stromfluß stoßen die freien Elektronen auf die Elektronen der vollen Schalen des Leiteratoms und regen diese zum Schwingen an. Die freien Elektronen verlieren bei diesem Anstoßen an die übrigen Elektronen einen Teil ihrer Bewegungsenergie, der in Schwingungsenergie umgewandelt wird.

Durch Energieumwandlung ist aus der Bewegungsenergie der freien Elektronen (= elektrische Energie) Schwingungsenergie der übrigen Elektronen (= Wärmeenergie) entstanden.

a) Die spezifische Wärme

Zum besseren Verständnis der folgenden Abschnitte geben wir Ihnen einen kurzen Rückblick auf die Wärmelehre.

Wie Sie aus der Physik wissen, ist die Einheit der Wärmeenergie die Kalorie (= cal).

Eine Kalorie ist diejenige Wärmemenge, die man einem Gramm Wasser zuführen muß, um seine Temperatur von $14,5^\circ \text{C}$ auf $15,5^\circ \text{C}$, also um 1 grd, zu erhöhen.

Größere Wärmemengen werden in Kilokalorien (kcal) gemessen ($1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}$). Eine weitere wichtige Größe ist die spe-

zifische Wärme c , die für die einzelnen Stoffe sehr unterschiedlich ist.

Als spezifische Wärme c eines Stoffes bezeichnet man diejenige Wärmemenge, die nötig ist, 1 g des betreffenden Stoffes um 1 grd zu erwärmen.

Die Einheit der spezifischen Wärme ist $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$.

So ist z.B. die spezifische Wärme

von Kupfer $c = 0,093 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$

von Aluminium $c = 0,217 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$

von Maschinenöl $c = 0,4 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$

von Petroleum $c = 0,5 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$

von Wasser $c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$ oder $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}}$

Die zur Erwärmung von Stoffen notwendige Wärmemenge Q errechnet man mit der Gleichung

$$Q = m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (24)$$

wobei ϑ_1 die Temperatur zu Beginn und ϑ_2 am Ende des Erwärmungsprozesses in $^{\circ}\text{C}$ und m das Gewicht des Stoffes symbolisiert.

Lehrbeispiel 17

Bestimmen Sie die notwendige Wärmemenge, um 8 l Wasser von 14°C auf 80°C zu erwärmen!

Lösung:

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1) \\ &= 8 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grad}} (80^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}) \\ &= 8 \frac{\text{kcal}}{\text{grad}} \cdot 66 \text{ grad} \\ &= 528 \text{ kcal} \\ &===== \end{aligned}$$

b) Das elektrische Wärmeäquivalent

Um das elektrische Wärmeäquivalent festzustellen, sollen Sie den in Bild 22 dargestellten Versuch durchführen. Sie brauchen dazu eine Thermosflasche, ein Thermometer, einen Tauchsieder, einen Spannungsmesser, einen Strommesser und eine Stoppuhr. Nehmen wir an, die Thermosflasche wäre mit 0,5 l Wasser von 20° C gefüllt. Der Tauchsieder nimmt eine Leistung von 440 W auf, was auch durch die Strom- und Spannungsmessung kontrolliert werden kann. Nach 3 Minuten hat sich das Wasser auf 57,8° C erhitzt. Weil eine Thermosflasche benutzt wurde, ist der Wirkungsgrad gleich 1 zu setzen, die Verluste sollen also gleich 0 sein.

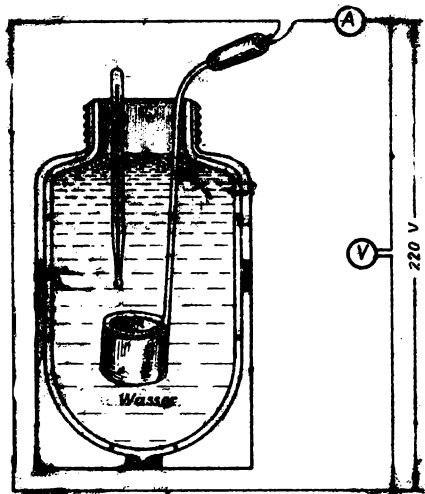


Bild 22: Versuch zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents

Berechnen Sie

- die notwendige elektrische Arbeit und
- die gewonnene Wärmeenergie!

a) Elektrische Arbeit

$$\begin{aligned}
 W &= U \cdot I \cdot t = P \cdot t \\
 &= 440 \text{ W} \cdot \frac{3}{60} \text{ h} \\
 &= 22 \text{ Wh} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

b) Gewonnene Wärmeenergie

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \\
 &= 0,5 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grd}} (57,8^\circ \text{ C} - 20^\circ \text{ C}) \\
 &= 0,5 \frac{\text{kcal}}{\text{grd}} \cdot 37,8 \text{ grd} = 18,9 \text{ kcal} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

Aus diesem Versuch können Sie schließen:

Da $22 \text{ Wh} \hat{=} 18,9 \text{ kcal}$, folgt

$$1 \text{ Wh} \hat{=} \frac{18,9 \text{ kcal}}{22} \hat{=} 0,860 \text{ kcal}$$

Es können also aus 1 Wh 0,860 kcal Wärmeenergie gewonnen werden.

Wenn Sie die Wärmemenge finden wollen, die 1 Ws erzeugt, dann gilt

$$1 \text{ Ws} \hat{=} \frac{0,860 \text{ kcal}}{3600} \hat{=} 0,000239 \text{ kcal} \hat{=} 0,239 \text{ cal}$$

Diese Gesetzmäßigkeit hat der Physiker Joule (sprich dschaul) im Jahre 1841 entdeckt:

Die elektrische Arbeit von 1 Ws (= 1 Joule) ist der Wärmearbeit von 0,239 cal gleichwertig.

Die Größe $0,239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$ nennt man das elektrische Wärmeäquivalent K.

Bezieht man die Wärmearbeit nicht auf die Ws, sondern auf kWh oder Wh, dann erhält man als Äquivalent:

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 860 \text{ kcal}; \text{ Äquivalent: } 860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$$

$$1 \text{ Wh} \hat{=} 860 \text{ cal}; \text{ Äquivalent: } 860 \frac{\text{cal}}{\text{Wh}}$$

c) Das Joulesche Gesetz

Die elektrische Arbeit hatten wir nach folgender Gleichung ermittelt:

$$W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t$$

Multipliziert man diese Gleichung mit dem elektrischen Wärmeäquivalent K, dann erhält man die Wärmemenge Q, die durch Energieumformung der elektrischen Arbeit entstanden ist.

$$Q = K \cdot U \cdot I \cdot t = K \cdot P \cdot t \quad (25a)$$

Aus dieser Gleichung können Sie das Joulesche Gesetz ableiten:

Die erzeugte Wärmemenge ist der Spannung U, dem Strom I und der Zeit t proportional.

Lassen Sie auf keinen Fall beim Rechnen mit dieser Gleichung die Einheiten der einzelnen Größen außer acht! Setzen Sie z.B.

die Leistung P in Watt und die Zeit t in Sekunden ein, dann müssen Sie als das elektrische Wärmeäquivalent $0,239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$ verwenden; die Einheit der Wärmemenge ist dann cal. Ist jedoch die Leistung P in kW und die Zeit t in Stunden angegeben, dann setzt man als elektrisches Wärmeäquivalent $860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$. Die Einheit der Wärmemenge wäre in diesem Fall kcal. Beachten Sie also in jedem Fall die Einheiten und führen Sie diese bei der Rechnung mit!

Lehrbeispiel 18

Berechnen Sie die Wärmemenge, die ein Tauchsieder von 1,2 kW in 30 Minuten erzeugen kann!

Lösung:

$$\begin{aligned} Q &= K \cdot P \cdot t \\ &= 860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}} \cdot 1,2 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} \\ &= 516 \text{ kcal} \\ &===== \end{aligned}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz sind von der Gleichung (25a)

$$Q = K \cdot U \cdot I \cdot t$$

noch folgende Umformung möglich:

$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot t$	(25b)
und $Q = K \cdot \frac{U^2}{R} \cdot t$	(25c)

Lehrbeispiel 19

Der Inhalt eines 80-Liter-Badespeichers soll von 22 Uhr bis 6 Uhr von 14°C auf 85°C bei einem Wirkungsgrad $\eta = 95\%$ erwärmt werden (220 V).

- a) Welche Leistung muß das Heizelement des Speichers haben?
- b) Wieviel Stunden ist der Speicher in Betrieb, wenn sein Heizelement eine Leistung von 1 kW hat und der Regler bei 85°C Wassertemperatur abschaltet?
- c) Was kostet das Erwärmen des Wassers, wenn beim Nachttarif 1 kWh mit 0,04 DM berechnet wird?
- d) Wie groß ist der Widerstand des unter a) berechneten Heizelements?

Lösung:

gegeben: $m = 80 \text{ kg}$
 $t = 8 \text{ h}$
 $\vartheta_2 - \vartheta_1 = 71 \text{ grad}$
 $\eta = 95 \%$
 $U = 220 \text{ V}$

gesucht: a) $P = ?$

b) t , wenn $P = 1 \text{ kW}$

$\vartheta_2 = 85^\circ \text{ C}$

c) Kosten, wenn 1 kWh

$\hat{=} 0,04 \text{ DM}$

d) R des Heizelements
 von a)

$$\text{a) } P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t \cdot \eta} = \frac{W}{t \cdot \eta}$$

$$W = \frac{Q}{\eta}$$

$$Q = m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$W = \frac{m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{\eta}$$

$$P = \frac{m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{K \cdot t} = \frac{80 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal} \cdot 71 \text{ grad} \cdot \text{kWh}}{\text{kg} \cdot \text{grad} \cdot 860 \text{ kcal} \cdot 8 \text{ h} \cdot 0,95}$$

$$P = 0,869 \text{ kW} = 869 \text{ W}$$

b) Aufheizzeit bei $P = 1 \text{ kW}$

$$W = P \cdot \eta \cdot t$$

$$t = \frac{W}{P \cdot \eta}$$

$$W = \frac{Q}{\eta}$$

$$Q = m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$W = \frac{m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{\eta}$$

$$t = \frac{m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{K \cdot P \cdot \eta} = \frac{80 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal} \cdot 71 \text{ grad} \cdot \text{kWh}}{\text{kg} \cdot \text{grad} \cdot 860 \text{ kcal} \cdot 1 \text{ kW} \cdot 0,95}$$

$$t = 6,95 \text{ h}$$

$$\text{c) Kosten} = W \cdot \text{Tarifpreis} = 1 \text{ kW} \cdot 6,95 \text{ h} \cdot \frac{0,04 \text{ DM}}{\text{kWh}}$$

$$\approx 0,28 \text{ DM}$$

$$\text{d) } P = \frac{U^2}{R}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2 \text{ V}^2}{869 \text{ W}} = \frac{48400 \text{ V}^2}{869 \text{ W}} = 55,7 \Omega$$

1.5.2.2. Anwendungen

a) Nutz- und Verlustwärme

Es ist Ihnen bekannt, daß jeder Strom beim Durchfließen von Leitern Wärme erzeugt, die teils erwünscht, teils unerwünscht ist. Erwünscht ist die Wärme in sogenannten Elektrowärmege-
räten, deren Aufgabe es ist, elektrische Energie in Wärme-
energie umzusetzen. Wir wollen deshalb auch die erzeugte Wärme in Elektrowärmege-
räten als Nutzwärme bezeichnen. Uner-
wünscht dagegen ist die Wärme, die in Installationsleitungen, Freileitungen und Kabeln auftritt. Da jede Leitung einen Wi-
derstand hat, wandelt sich bei Stromfluß ein Teil der trans-
portierten Energie in Wärmeenergie um. Von der transportier-
ten elektrischen Energie zweigt sich ein Teil ab, der als
Wärmeenergie nutzlos bei Freileitungen an die Luft und bei
Kabeln an das umgebende Medium abgegeben wird. Man bezeichnet
deshalb diese Wärme als Verlustwärme. Sie tritt auch im
Innern von Generatoren, Transformatoren und Motoren auf.

b) Elektrowärmege- räte

Bevor Sie die einzelnen Elektrowärmege-
räte betrachten, sollen Sie sich kurz mit der Wirtschaftlichkeit dieser Geräte be-
schäftigen. Für Wärmezwecke wird üblicherweise Kohle verwen-
det. Um die Wirtschaftlichkeit von Elektrowärmege-
räten zu untersuchen, ist es daher das gegebenste, wenn Sie Kohle zum
Vergleich heranziehen. Braunkohlenbriketts haben einen mitt-
leren Heizwert von

4000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, 50 kg kosten ca. 1,60 DM.

$$\begin{aligned} Q_{\text{Kohle}} &= 50 \text{ kg} \cdot 4000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 200\,000 \text{ kcal} \\ &= 200\,000 \text{ kcal} \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{kcal}} = 232 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Bei Kohle kostet demnach 1 kWh = $\frac{1,60 \text{ DM}}{232} = 0,0069 \text{ DM}$

bei Elektrizität 1 kWh = 0,04 bis 0,08 DM
(Haushaltstarif)

Bei dieser Betrachtung ist der Wirkungsgrad des Ofens bzw.

des Elektrogerätes nicht berücksichtigt worden.

Sie sehen aus dieser Gegenüberstellung, daß die elektrische Wärmeerzeugung rund 10mal teurer ist als das Heizen mit Kohle. Jene hat aber trotzdem gegenüber Kohle in bestimmten Fällen große Vorteile, wie sofortige Betriebsbereitschaft, Sauberkeit, keine Ascherückstände, bessere Regelbarkeit und Konzentrierung der Wärmeentwicklung.

Elektrowärmegeräte im Haushalt

Die Wärmequelle fast aller im Haushalt verwendeten Geräte ist ein stromdurchflossener Widerstandsdraht, der meist aus Chromnickel ($\rho_{20} = 1,1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$) besteht. Chromnickel eignet sich deshalb besonders gut als Widerstandsdraht, weil es erstens einen hohen spezifischen Widerstand und zweitens eine hohe Gebrauchstemperatur (1000°C) hat. Der Widerstandsdraht wird in die Geräte so eingebaut, daß er einerseits gegen seine Umgebung gut isoliert ist und andererseits mit den zu erwärmenden Stellen einen guten Wärmekontakt hat.

Das verbreitetste Haushalt-Elektrowärmegerät ist wohl die elektrische Kochplatte (Bild 23). In ihr ist der Heizleiter in eine Isoliermasse eingepreßt worden. Diese füllt mit dem Heizleiter die Rillen einer gußeisernen Platte, so daß ein guter Wärmeübergang vom Widerstandsdraht auf die eigentliche Kochplatte gewährleistet ist.

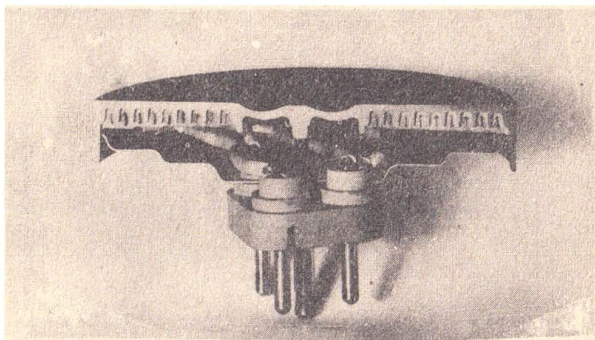


Bild 23: Kochplatte

Weit verbreitet sind auch die elektrischen Kleinküchen (Bild 24), bei denen der Heizleiter in dem wulstförmigen Rand des Deckels liegt. Durch diese Anordnung erreicht man,

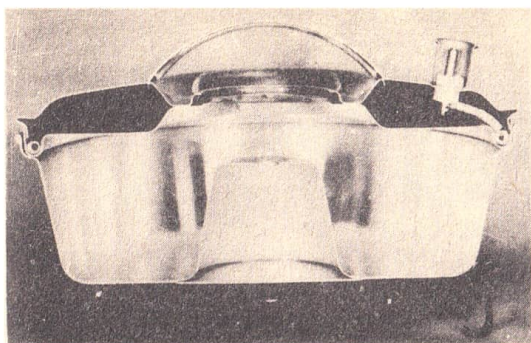
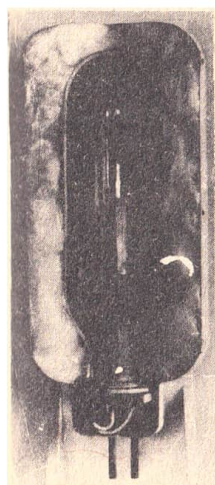


Bild 24: Kleinküche

daß nicht nur der Deckel, sondern auch das Unterteil gleichmäßig beheizt wird. Bei den elektrischen Heißwasserspeichern (Bild 25) ist der Innenkessel vom Außenmantel gegen Wärmeverluste durch eine Isolierschicht aus Glaswolle geschützt. Beheizt wird der Heißwasserspeicher durch



das Heizelement. Der Flansch dichtet den Innenkessel ab und trägt das Heizelement und den Regler, der bei ca. 80°C Wassertemperatur den Stromfluß durch das Heizelement unterbricht. Fällt die Wassertemperatur durch Zufluß von kaltem Wasser unter 80°C ab, dann schaltet der Regler das Heizelement wieder ein.

Leistungsaufnahme von Haushalt-Elektrowärme-geräten

Heizkissen	ca. 60 W
Bügeleisen	ca. 700 W
Kleinküchen	ca. 700 W
Kochplatten	ca. 1200 W
Elektroherde	ca. 5 kW
Heißwasserspeicher	ca. 1 kW

**Bild 25:
Heißwasser-
speicher**

Elektrowärme in der Industrie

In der Industrie unterscheidet man zwischen drei Heizungsarten:

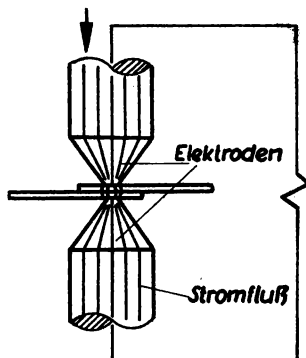
- der Widerstandsheizung,
- der Lichtbogenheizung,
- der Infrarotheizung.

Die Widerstandsheizung wendet man zur Erwärmung industrieller

Öfen (Glüh-, Härte- und Trockenöfen) an. Auch hier wird als Heizleitermaterial vorwiegend Chromnickeldraht oder -band benutzt, das auf wärmebeständigen Isolierteilen aus Glimmer, Steatit oder Porzellan aufgewickelt ist.

Eine besondere Form der Widerstandsheizung finden Sie in der Schweißtechnik (Punkt-, Naht- und Stumpfschweißung). Hier wirkt das zu schweißende Material als Widerstand.

Beim Punktschweißen (Bild 26) klemmt man die zu schweißenden Bleche zwischen zwei wassergekühlte Elektroden. Leitet man den Strom über die zwei Elektroden durch das Blech, dann erwärmt es sich infolge seines Widerstandes bis zur Schweißtemperatur.



Punktschweißen

Bild 26

Die erforderliche Spannung zum Widerstandsschweißen beträgt nur 1 ... 5 V, während der Strom je nach dem Querschnitt der Schweißstelle (denken Sie an die Stromdichte!) bis auf mehrere tausend Ampere anwachsen kann. Diese hohen Stromstärken für Widerstandsschweißungen erhält man wirtschaftlich nur in sogenannten Schweißtransformatoren; deshalb wird auch nur Wechselstrom für Widerstandsschweißen angewendet.

Für sehr hohe Temperaturen (über 1300°C) ist die Widerstandsheizung nicht geeignet, man verwendet hier die Lichtbogenheizung, die Temperaturen bis zu 3700°C zuläßt. Die Lichtbogenöfen dienen hauptsächlich zum Schmelzen von Stahl oder auch zur Gewinnung von Aluminium, Kalium und Natrium. Das Schmelzen von Stahl geschieht meist mit Wechselstrom, während für die Gewinnung von Aluminium, Kalium und Natrium unbedingt Gleichstrom nötig ist, weil neben der Wärmewirkung auch noch die chemische Wirkung des elektrischen Stromes ausgenützt wird.

Bei den Lichtbogenöfen gibt es die verschiedensten Ausführungsformen. Bei dem Lichtbogenofen (Bild 27) werden die Koh-

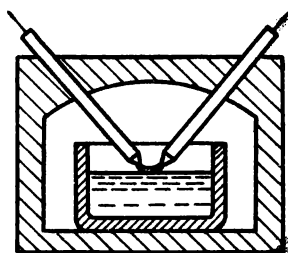


Bild 27: Lichtbogen-
ofen

len so weit hineingeschoben, daß der Lichtbogen gerade über der Schmelze entsteht. Besondere Vorrichtungen (Blasmagnete) sorgen dafür, daß der Lichtbogen nicht aufsteigt.

Eine weitere Anwendung der Lichtbogenheizung ist das Lichtbogenschweißen. Beim Lichtbogenschweißen erzeugt man an der Schweißstelle einen elektrischen Lichtbogen. Bei der gebräuch-

lichsten Art des Lichtbogenschweißens wird der eine Pol auf das zu schweißende Material gelegt, und der andere Pol liegt an der sogenannten Elektrode, einem Metallstift aus dem gleichen Material wie das zu schweißende.

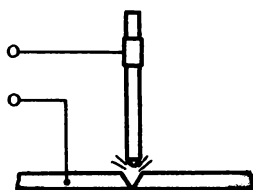


Bild 28: Licht-
bogenschweißen

Zwischen Elektrode und dem Schweißstück entsteht ein Lichtbogen, die Elektrode schmilzt ab und wird auf dem Schweißstück, das sich auch auf Schweißtemperatur erhitzt hat, aufgetragen (Bild 28).

Die Infrarotheizung gewinnt in den letzten Jahren merklich an Bedeutung. Sie ist eine Strahlungsheizung und wird in der

Industrie vornehmlich für Trockenöfen eingesetzt. Man unterscheidet dabei zwischen sogenannten Hell- und Dunkelstrahlern. Die Hellstrahler senden außer Wärmeenergie auch noch Lichtenergie aus, während die Dunkelstrahler nur Wärmeenergie liefern.

c) Schmelzsicherungen und Temperaturschalter

Sicherungen haben die Aufgabe, den Stromkreis bei Überstrom zu unterbrechen und so vor Schaden zu bewahren.

Schmelzsicherungen bestehen im wesentlichen aus einem von dem Gesamtstrom der Anlage durchflossenen Drahtstück. Es hat einen Widerstand R , der so festgelegt ist, daß die Erwärmung beim Durchfließen der Nennstromstärke den Widerstandsdraht nicht zum Schmelzen bringt. Steigt jedoch die Stromstärke über die Nennstromstärke an, dann erwärmt sich der Schmelz-

draht bis zur Schmelztemperatur, und der Stromfluß wird unterbrochen.

Die Schmelzsicherungen werden meistens als Patronensicherung ausgeführt, deren Aufbau Sie aus dem Bild 29 ansehen können.

Beim Temperaturschalter

wird das Schalten durch

die Erwärmung beim

Stromdurchfluß verur-

sacht. Das wichtigste

Element des Temperaturschalters ist der Bimetallstreifen. Wie Ihnen

sicher bekannt ist,

dehnt sich ein Metall-

körper bei Erwärmung

aus. Man walzt dazu

zwei Metalle mit einem

unterschiedlichen Aus-

dehnungskoeffizienten α zu einem Bimetallstreifen und biegt

ihn in U-Form. Beim Biegen ist zu beachten, daß das Metall

mit dem größeren Ausdehnungskoeffizienten nach innen kommt.

Der Bimetallstreifen wird mit Kontakten versehen und in den

Stromkreis, wie in Bild 30 gezeichnet, eingeschaltet. Der

Temperaturschalter wird in Verbindung mit einem Heizwider-

stand (im Heizkissen oder auch bei elektrischen Heizkörpern)

zu einem Regler der Temperatur seiner Umgebung. Auf die Deh-

nung des Bimetallstreifens wirkt der im Stromkreis fließende

Strom nicht direkt, weil die Kontakte isoliert an dem Bime-

tallstreifen angebracht sind, sondern die von dem Heizwider-

stand an die Umgebung abgegebene Wärme. Bei geschlossenen

Kontakten, also kaltem Bimetallstreifen, fließt Strom durch

den Heizwiderstand. Dieser heizt die Umgebung, und damit erwärmt

und dehnt sich auch der Bimetallstreifen so weit, daß

er den Stromfluß unterbricht. Die Umgebungstemperatur sinkt

ab, der Bimetallstreifen zieht sich zusammen und schaltet den

Heizwiderstand ein usw.

Kenn-
draht

Quarz-
sand

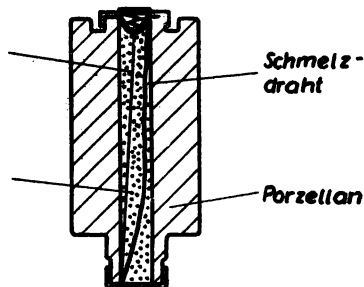


Bild 29: Patronensicherung

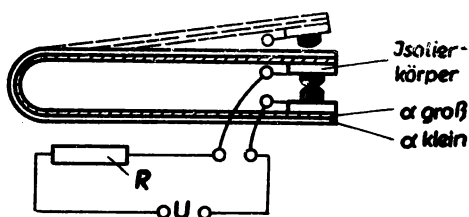


Bild 30: Temperaturschalter

die Stromwärme (Erwärmung des Bimetallstreifens beim Stromdurchfluß), um den Schaltvorgang auszulösen. Die Wirkungsweise des Überstromauslösers erkennen Sie aus dem Bild 31. Der Strom I ruft durch seine Stromwärme beim Durchfluß durch den Bimetallstreifen eine Dehnung des Streifens hervor. Der Bimetallstreifen ist so ausgelegt, daß er von einer bestimmten Stromstärke an so stark erwärmt und damit gedehnt wird, daß er ein gespanntes Kniehebelwerk zum Auslösen bringt, das dann den Stromfluß unterbricht.

Das Prinzip des Überstromauslösers nutzt man in den Sicherungsautomaten (Bild 32) aus, die bei einer bestimmten Stromstärke (6 A, 10 A usw.) den Stromkreis unterbrechen. Der Schaltvorgang wird deswegen über ein Kniehebelwerk ausgelöst, um den Stromkreis plötzlich zu unterbrechen und keinen Lichtbogen entstehen zu lassen. Außer dem Bimetallsystem befindet

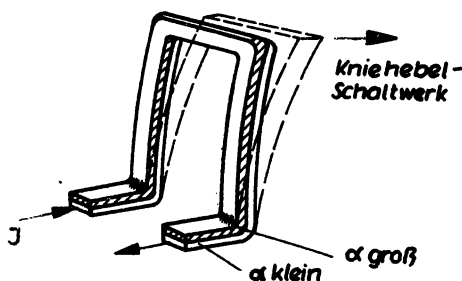


Bild 31: Überstromauslöser

Während man beim Temperaturschalter den Bimetallstreifen durch die Umgebung erwärmen läßt, leitet man beim Überstromauslöser den Strom direkt durch den Bimetallstreifen und nützt

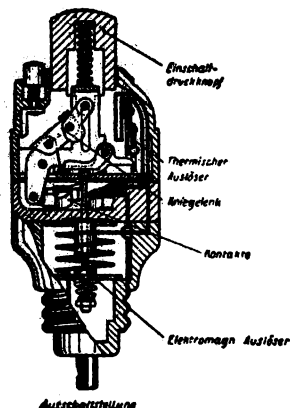


Bild 32: Sicherungsautomat

sich in den Sicherungsautomaten noch ein Magnetsystem für Abschaltungen bei Kurzschlüssen.

1.5.2.3. Umformung von Wärmeenergie in elektrische Energie

Im Lehrbrief 1 ist Ihnen bereits kurz die Ursprungserzeugung durch Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie erläutert worden. Beachten Sie, daß diese Erscheinung nicht als eine Umkehrung der Wärmewirkung zu betrachten ist. Die einfachste Methode, elektrische Energie in Wärmeenergie zu verwandeln, beruht darauf, daß durch einen Widerstandsdraht Strom fließt. Erwärmen Sie jedoch den Widerstandsdraht, so entsteht keine Ursprungsspannung. Eine Ursprungsspannung entsteht nur, wenn zwei Metalle oder Metallegierungen innig miteinander verbunden werden und diese Stelle erwärmt wird. Wiederholen Sie den Abschnitt unter 1.2.3. des 1. Lehrbriefes!

Wie Ihnen bekannt ist, beginnen die Elektronen beim Erwärmen zu schwingen. Die Elektronen des einen Metalls oder der Metallegierung sind bemüht, sich an der Grenzfläche in den Atomverband des anderen hineinzudrücken und umgekehrt. Da es sich nicht um zwei gleiche Metalle bzw. um Metallegierungen handelt, ist auch der Druck des einen auf das andere unterschiedlich: Es entsteht eine Ursprungsspannung. Um den Stromkreis zu schließen, ist eine zweite Kontaktstelle zwischen den Metallen bzw. Metallegierungen notwendig, in der ebenfalls eine Ursprungsspannung, die der ersten entgegengerichtet ist, erzeugt wird. Damit sich die beiden Ursprungsspannungen nicht restlos aufheben, müssen beide Kontaktstellen eine unterschiedliche Temperatur haben. Der Elektronendruck an der wärmeren Kontaktstelle ist demnach stärker als an der kälteren; es fließt die Differenzursprungsspannung von den beiden Berührungstellen, die Thermoursprungsspannung.

Maßgebend für die Höhe der Thermoursprungsspannung ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Berührungstellen und der Elektronendruck der einzelnen Metalle bzw. Metallegierungen.

Um die Höhe der Thermoursprungsspannung angeben zu können, hat man

durch Versuche ermittelt, welche Thermourspannung die einzelnen Metalle bei einer Temperaturdifferenz der beiden Berührungsstellen von 100 Grd gegen Platin erzeugen. Aus dieser Aufstellung der einzelnen Metalle, die man als Spannungsreihe bezeichnet, kann die Thermourspannung zwischen zwei beliebigen Metallen bestimmt werden (Bild 33).

Tafel 3
Spannungsreihe E (mV/100Grd)

Wismut	E = - 6,5	Wolfram	E = + 0,7
Konstantan	- 3,5	Silber	+ 0,7
Natrium	- 0,2	Kupfer	+ 0,7
Quecksilber	± 0,0	Zink	+ 0,7
Platin	± 0,0	Gold	+ 0,7
Blei	+ 0,4	Kadmium	+ 0,9
Aluminium	+ 0,4	Messing	+ 1,1
Manganin	+ 0,6	Eisen	+ 1,8
Iridium	+ 0,65	Nickelchrom	+ 2,2
		Antimon	+ 4,8

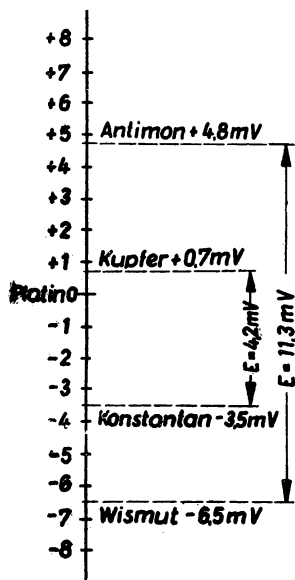


Bild 33: Spannungsreihe

Mit Hilfe dieser Tafel können Sie die Thermourspannung bei einer Temperaturdifferenz von 100 Grd der einzelnen Thermoelemente bestimmen. Wie Sie aus dem Bild 33 ersehen, erzeugt ein Thermoelement aus Wismut und Antimon bei einer Temperaturdifferenz von 100 Grd eine Urspannung von 11,3 mV. In der Mehrzahl wird jedoch das Kupfer-Konstantan-Element verwendet, weil es billiger als das Wismut-Antimon-Element ist. Kupfer-Konstantan-Elemente erzeugen bei einer Temperaturdifferenz von 100 Grd eine Urspannung von 4,2 mV.

Wir hatten bereits festgestellt, daß der Thermoeffekt im Thermoelement

keine Umkehrung des Prozesses der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie darstellt. Der Thermoeffekt allerdings läßt sich umkehren. Dieser Prozeß hat bis jetzt jedoch noch keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt und soll nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Schickt man durch ein Thermoelement einen Strom, dann erwärmt sich die eine Lötstelle, während sich die andere abkühlt; es entsteht zwischen den beiden Lötstellen eine Temperaturdifferenz. Diese Erscheinung bezeichnet man als Peltier-Effekt. Infolge des geringen Wirkungsgrades findet der Peltier-Effekt in der Technik bis heute noch keine Anwendung.

Anwendung der Thermoelemente

a) Temperaturmessungen

Dazu wird die eine Lötstelle des Thermoelements an den Ort gebracht, dessen Temperatur gemessen werden soll, während die Temperatur der zweiten Lötstelle konstant bleiben muß. Durch die Temperaturdifferenz zwischen beiden Lötstellen entsteht eine Urspannung, die mit einem empfindlichen Spannungsmesser gemessen werden kann. Aus der angezeigten Spannung in Millivolt (mV) kann man den Temperaturunterschied zwischen den beiden Lötstellen und daraus die unbekannte Temperatur ermitteln.

Lehrbeispiel 20

Es soll mit einem Thermoelement die Temperatur eines Emailofens festgestellt werden. Die eine Lötstelle des Thermoelements befindet sich im Innern des Ofens, die andere an einem Ort mit der Temperatur von 20°C . Der Spannungsmesser zeigt eine Urspannung von 36,9 mV. Welche Temperatur ϑ_w herrscht im Innern des Ofens, wenn ein Kupfer-Konstantan-Element verwendet wurde (ohne Berücksichtigung von Leitungsverlusten)?

Lösung:

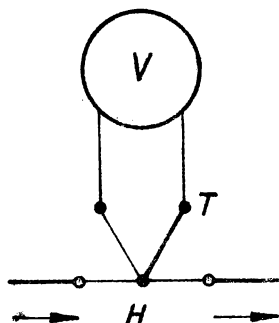
Nach der Spannungsreihe erzeugt ein Kupfer-Konstantan-Element bei einem Temperaturunterschied von 100 grd eine Urspannung

von 4,2 mV.

$$\begin{aligned} \vartheta_W &= \frac{36,9 \text{ mV} \cdot 100 \text{ grd}}{4,2 \text{ mV}} + 20^\circ \text{ C} \\ &= 879 \text{ grd} + 20^\circ \text{ C} \\ &= 899^\circ \text{ C} \\ &\approx 900^\circ \text{ C} \\ &===== \end{aligned}$$

b) Messung von Wechselströmen

Vielfach werden jetzt in der Hochfrequenztechnik für Meßzwecke Thermoelemente benutzt. Sie sind dabei so angeordnet, daß die eine Lötstelle des Elements durch einen Widerstandsdraht erwärmt wird, durch den der zu messende Strom fließt. Zwischen beiden Lötstellen entsteht demnach eine Temperaturdifferenz, die um so größer wird, je stärker der durch den Widerstandsdraht fließende Strom und damit die Erwärmung der einen Lötstelle ist. Da sich mit steigender Temperaturdifferenz auch die erzeugte Ursprungspannung im Thermoelement vergrößert, ist es möglich, mit Hilfe von empfindlichen Gleichspannungsmeßinstrumenten über den Umweg des Thermoelements Wechselspannungen und -ströme zu messen. Die zur Strommessung verwendeten Thermoelemente bezeichnet man als Thermoumformer (Bild 34).



Zusammenfassung

Eine Kalorie (cal) ist diejenige Wärmemenge, die man 1 g Wasser zu-

führen muß, um seine Temperatur von 14° C auf 15,5° C, also um 1 grd zu erhöhen. Unter der spezifischen Wärme eines Stoffes versteht man diejenige Wärmemenge, die nötig ist, 1 g des betreffenden Stoffes um 1 grd zu erwärmen.

H = Heizdraht
T = Thermoelement

Bild 34: Thermoumformer mit Voltmeter

Zum Umrechnen von elektrischer Arbeit in Wärmearbeit wird das elektrische Wärmeäquivalent benutzt: Die elektrische Arbeit von 1 Js (= 1 Joule) ist der Wärmearbeit von 0,239 cal gleichwertig oder auch

$$1 \text{ kWh} \hat{=} 860 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ Wh} \hat{=} 860 \text{ cal}$$

Das Joulesche Gesetz besagt, daß die erzeugte Wärmemenge der Spannung U , der Stromstärke I und der Zeit t proportional ist.

$$Q = K \cdot U \cdot I \cdot t = K \cdot P \cdot t$$

Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes wird vor allem bei den Elektrowärmegegeräten, den Schmelzsicherungen, den Temperaturschaltern und den Überstromauslösern ausgenützt. Bei den Haushaltelektrowärmegegeräten dient als Wärmequelle meist ein stromdurchflossener Widerstandsdraht; in der Industrie wird neben der Widerstandsheizung die Lichtbogenheizung (Schweißen und Schmelzen) und die Infrarotheizung (zum Trocknen) angewendet.

In den Schmelzsicherungen erwärmt sich bei Strömen, die stärker sind als der Nennstrom, der Widerstandsdraht in der Sicherung so stark, daß er schmilzt. Die Temperaturschalter bestehen im wesentlichen aus einem Bimetallstreifen, der sich bei Erwärmung seiner Umgebung gleichzeitig miterwärmt. Da der Bimetallstreifen aus zwei Metallen mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten α zusammengesetzt ist, krümmt er sich bei Erwärmung und unterbricht den Stromkreis. Bei den Überstromauslösern wird der Bimetallstreifen direkt von dem Strom durchflossen. Bei Strömen über der Nennstromstärke ist die Erwärmung und damit die Krümmung des Bimetallstreifens so groß, daß ein Hebelwerk ausgelöst wird, das den Stromkreis unterbricht.

In den Thermoelementen kann man durch eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Lötstellen eine Urspannung erzeugen. Die Höhe der erzeugten Urspannung richtet sich danach, wie weit die zwei Metalle des Thermoelements in der Spannungsreihe auseinanderliegen. Die Erzeugung einer Urspannung im Thermoelement ist keine Umkehrung der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Thermoelemente verwendet man hauptsächlich zu Temperaturmessungen und zur Messung von Wechselströmen.

Wiederholungsfragen

15. Wozu dient das elektrische Wärmeäquivalent?

16. Wie lautet das Joulesche Gesetz?
17. Welcher Unterschied in der Erwärmung besteht zwischen dem Punktschweißen und dem Lichtbogenschweißen?
18. Welcher Unterschied besteht zwischen den Schmelzsicherungen und den Überstromauslösern?
19. Welche beiden Faktoren bestimmen die Höhe der erzeugten Urspannung in einem Thermoelement?
20. Wozu werden Thermoelemente hauptsächlich angewendet?

Übungen

17. Was kostet die Bereitung eines Wannenbades von 130 l, wenn das Wasser von 14°C auf 42°C (wobei 1 l Wasser $\hat{=}$ 1 kg)
 - a) im Kohlebadofen, $\eta = 0,5$, Heizwert von Braunkohlenbriketts $H_B = 4500 \text{ kcal/kg}$, 50 kg Braunkohlenbriketts kosten 1,60 DM;
 - b) im Gasdurchlauferhitzer, $\eta = 0,8$, Heizwert von Stadtgas $H_{St} = 4000 \text{ kcal/m}^3$, 1 m^3 Stadtgas kostet 0,16 DM;
 - c) im elektrischen Heißwasserspeicher, $\eta = 0,9$, 1 kWh kostet 0,08 DM erwärmt werden soll?
18. Auf welche Temperatur erwärmt ein Tauchsieder von 1000 W 2 l Wasser von 14°C in 5 Minuten? $\eta = 0,95$.
19. Ein elektrisch beheizter Kochkessel mit 200 l Fassungsvermögen soll innerhalb von 2 Std. Wasser von 14°C auf den Siedepunkt erhitzen. Welche Leistung muß der Kessel haben, wenn sein Wirkungsgrad $\eta = 0,85$ ist?
20. Welche Urspannung erzeugt ein Wismut-Antimon-Thermoelement bei einem Temperaturunterschied der beiden Lötstellen von 600°C ?
21. Welche Verlustwärme gibt eine 150 m lange Kupferdoppelleitung von $1,5 \text{ mm}^2$ Querschnitt, die von 10 A durchflossen wird, während 1 h an die Umgebung ab?

Antworten auf die Wiederholungsfragen

=====

1. Im unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke an allen Punkten gleich.
2. Je größer der innere Widerstand einer Spannungsquelle ist, um so mehr sinkt die Klemmenspannung gegenüber der Urspannung = Leerlaufspannung bei Stromfluß ab.
3. Im unverzweigten Stromkreis verhalten sich die Spannungsabfälle wie die dazugehörigen Widerstände.
4. Bei der Parallelschaltung von Widerständen verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die Widerstände.
5. Die Berechnung von parallelgeschalteten Widerständen mit Hilfe der Leitwerte ist einfacher, weil man für den Leitwert des Ersatzwiderstandes nur die Summe der Leitwerte der Einzelwiderstände bildet, während man bei der Rechnung mit Widerständen Brüche addieren muß.
6. Das 1. Kirchhoffsche Gesetz lautet:
In jedem Knotenpunkt ist die Summe aller zufließenden gleich der Summe aller abfließenden Ströme.

$$\sum I_{\text{zufl}} = \sum I_{\text{abfl}}$$

7. Nebenwiderstände oder Shunts benützt man zur Meßbereichserweiterung von Strommessern, Vorschaltwiderstände zur Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern.
8. Die Spannungsquellen werden in Reihe geschaltet, wenn der Außenwiderstand größer ist als der Innenwiderstand; man schaltet sie parallel, wenn der Außenwiderstand kleiner ist als der Innenwiderstand des Stromkreises.
9. Das 2. Kirchhoffsche Gesetz lautet:
In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle.

$$\sum E = \sum U$$

10. Bei Energieumwandlungen in einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtmenge der einzelnen Energien konstant.
11. Die Energie mißt man mit den Einheiten der Arbeit. Die Einheit der elektrischen Arbeit ist die Wattsekunde (Ws)

oder Kilowattstunde (kWh), der mechanischen Arbeit das Kilopondmeter (kpm) und der Wärmeenergie die Kalorie (cal) oder die Kilokalorie (kcal).

12. Als Leistung bezeichnet man die durch Energieumwandlung freiwerdende Arbeit während einer Zeiteinheit.

$$\text{Leistung } P = \frac{\text{bei Energieumwandlung verrichtete Arbeit}}{\text{Zeitdauer der Arbeit}}$$

Demnach gilt für die elektrische Leistung:

$$P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

13. Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis zwischen abgegebener und zugeführter Leistung an

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

bzw.

$$\eta \% = \frac{P_{ab} \cdot 100}{P_{zu}}$$

14. Der Elektrizitätszähler in Ihrer Wohnung zählt Arbeit; denn er zählt die zur Energieänderung benutzte elektrische Energie (für Wärme, Licht und mechanische Energie) nicht nur während einer bestimmten Zeiteinheit wie Sekunde oder Stunde, sondern dauernd.
15. Das elektrische Wärmeäquivalent dient zur Umrechnung von elektrischer Arbeit in Wärmearbeit. Je nach Einheit können außer dem gesetzlich festgelegten elektrischen Wärmeäquivalent

$$0,239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$$

noch folgende Äquivalente zur Umrechnung benutzt werden:

$$860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$$

$$860 \frac{\text{cal}}{\text{Wh}}$$

16. Die erzeugte Wärmemenge ist der Spannung U , der Stromstärke I und der Zeit t proportional:

$$W = K \cdot U \cdot I \cdot t = K \cdot P \cdot t$$

17. Beim Punktschweißen verwendet man zur Erwärmung die Widerstandsheizung, beim Lichtbogenschweißen die Lichtbogenheizung.
18. Bei Schmelzsicherungen wird der Stromkreis durch das Schmelzen eines Drahtes unterbrochen, der so berechnet ist, daß die Erwärmung bei Strömen über der Nennstromstärke so groß ist, daß der Draht schmilzt. Nach dem Schmelzen des Drahtes sind Schmelzsicherungen nicht mehr verwendbar. Dagegen durchfließt der Strom bei den Überstromauslösern einen Bimetallstreifen, der sich bei großer Stromstärke ebenfalls erwärmt, aber nicht schmilzt, sondern sich biegt und dadurch ein Hebelwerk auslöst, das den Stromkreis unterbricht. Nachdem der Bimetallstreifen abgekühlt und das Hebelwerk gespannt ist, wird der Überstromauslöser wieder betriebsfähig.
19. Die Höhe der erzeugten Ursprungspannung in einem Thermoelement wird durch folgende zwei Faktoren bestimmt:
- a) wie weit liegen die beiden Metalle des Thermoelements in der Spannungsreihe auseinander,
 - b) welcher Temperaturunterschied besteht zwischen den Lötstellen?
20. Thermoelemente verwendet man hauptsächlich zu Temperaturmessungen und zur Messung von Wechselströmen.

Antworten und Lösungen

1. gegeben: $d = 0,9 \text{ mm}$ gesucht: a) l bei 20° C
 $R_{20} = 14,5 \Omega$ b) l bei 12° C
 $\vartheta_1 = 20^\circ \text{ C}$
 $\vartheta_2 = 12^\circ \text{ C}$
 $\rho = 0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Lösung: $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$

a) $l = \frac{R \cdot A}{\rho}$

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

$$l = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{8 \cdot \rho} = \frac{14,5 \, \Omega \cdot 3,14 \cdot 0,81 \text{ mm}^2 \cdot \text{m}}{8 \cdot 0,01786 \, \Omega \text{ mm}^2} = 258,1 \text{ m} \\ \text{=====}$$

Die Entfernung von der Meßstrecke beträgt $\frac{258,1 \text{ m}}{2}$
 $= 129,05 \text{ m}$

b) Hinweis zur Lösung:

Der Widerstand wurde nicht, wie angenommen bei 20°C sondern bei 12°C gemessen. Geringere Temperatur bedeutet geringeren Widerstand. Daher entsprechen die $14,5 \, \Omega$ einer größeren Länge des Leiters:

$$R = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l}{A} [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)]$$

$$l = \frac{R \cdot A}{\rho \cdot 2 [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)]}$$

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

$$l = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{\rho \cdot 8 [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)]}$$

$$l = \frac{14,5 \, \Omega \cdot \pi \cdot 0,81 \text{ mm}^2 \cdot \text{m}}{0,01786 \, \Omega \text{ mm}^2 \cdot 8 [1 + 0,00393 \frac{1}{\text{grd}} (-8 \text{ grd})]}$$

$$l = 266,5 \text{ m} \\ \text{=====}$$

Der Fehlerort liegt also $266,5 \text{ m} - 258,1 \text{ m} = \frac{8,4 \text{ m}}{2} = 4,2 \text{ m}$ von dem angenommenen entfernt.

2. a) $R_a = 420 \, \Omega$

b) $I = 0,5 \text{ A}$

Auf dieses Ergebnis kommt man auch durch folgende Überlegung: Die Stromstärke ist im unverzweigten Stromkreis an jedem Punkt gleich, also gleich der Stromstärke, die von einer Glühlampe aufgenommen wird.

c) $R_1 = 30 \, \Omega$

3. $\rho = 0,0286 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Laut Tabelle beträgt ρ für Aluminium $0,02857 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

4. a) $R \approx 227 \text{ V}$
 b) $I = 6,65 \text{ A}$
 c) $U_L = 2,32 \text{ V}$
 d) $U_1 = 93 \text{ V}$
 $U_2 = 119,7 \text{ V}$

5. $I_k = 880 \text{ A}$

6. $R_{\text{ers}} = 4,38 \Omega$

7. $R_{k_1} = 1379,3 \Omega$, $R_{k_2} = 1629,3 \Omega$, $R_{k_3} = 620 \Omega$
 $R_k = 740 \Omega$

8. $I = 1,143 \text{ A}$

9. a) $R_v = 2484 \Omega$
 b) $R_g = 1,852 \Omega$

10. $m = 5,24$, also 5 bis 6 Taschenlampenbatterien müssen parallelgeschaltet werden.

11. $P = 200 \text{ W}$

12. $P = 6,6 \text{ kW}$

13. $P_v = 190 \text{ W}$

14. $P_1 = 94 \text{ W}$

15. $P_{\text{zu}} = 8,659 \text{ kW}$

16. $1800 \text{ Umdr.} \hat{=} 1 \text{ kWh}$

$$1 \text{ Umdr.} \hat{=} \frac{1 \text{ kWh}}{1800}$$

$$\frac{42 \text{ Umdr.}}{\text{min}} \hat{=} \frac{1 \text{ kWh} \cdot 42}{1800 \cdot \text{min}}$$

$$\frac{42 \text{ Umdr.}}{\text{min}} \hat{=} \frac{1 \text{ kWh} \cdot 42 \cdot 60}{1800 \text{ h}} = 1,4 \text{ kW}$$

17. gegeben:

$m = 130 \text{ kg}$

$\vartheta_2 - \vartheta_1 = 28 \text{ grad}$

gesucht:

Kosten zur Bereitung des Wannensbades

a) im Kohlebadofen

$(\eta = 0,5, H_B = 4500 \text{ kcal/kg,}$
 $50 \text{ kg Briketts} \hat{=} 1,60 \text{ DM})$

b) im Gasdurchlauferhitzer

$$(\eta = 0,8, H_{\text{St}} 4000 \text{ kcal/m}^3, \\ 1 \text{ m}^3 \text{ Stadtgas} \hat{=} 0,16 \text{ DM})$$

c) im elektr. Heißwasserspeicher

$$(\eta = 0,9, 1 \text{ kWh} \hat{=} 0,08 \text{ DM})$$

Wärmeinhalt des erhitzten Wannenbades

$$Q = m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$= 130 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grd}} \cdot (42^\circ \text{ C} - 14^\circ \text{ C})$$

$$= 3640 \text{ kcal}$$

a) Kohlebadeofen

Benötigte Wärmemenge Q_k bei einem Wirkungsgrad

$$\eta = 0,5$$

$$Q_k = \frac{3640 \text{ kcal}}{0,5} = 7280 \text{ kcal}$$

Kosten der zur Erwärmung notwendigen Braunkohlenbriketts

$$\text{Kosten} = \frac{Q_k}{H_B} \cdot \frac{1,60 \text{ DM}}{50 \text{ kg}}$$

$$= \frac{7280 \text{ kcal} \cdot 1,60 \text{ DM}}{4500 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot 50 \text{ kg}}$$

$$= 0,052 \text{ DM}$$

=====

b) Benötigte Wärmemenge Q_G bei einem Wirkungsgrad

$$\eta = 0,8$$

$$Q_G = \frac{3640 \text{ kcal}}{0,8} = 4550 \text{ kcal}$$

$$\text{Kosten} = \frac{Q_G}{H_{\text{St}}} \cdot 0,16 \frac{\text{DM}}{\text{m}^3}$$

$$= \frac{4550 \text{ kcal}}{4000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}} \cdot 0,16 \frac{\text{DM}}{\text{m}^3} = 0,182 \text{ DM}$$

=====

c) Benötigte Wärmemenge Q_E bei einem Wirkungsgrad

$$\eta = 0,9$$

$$Q_E = \frac{3640 \text{ kcal}}{0,9} = 4044 \text{ kcal}$$

$$\text{Kosten} = \frac{4044 \text{ kcal}}{860 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}} \cdot 0,08 \frac{\text{DM}}{\text{kWh}} = 0,376 \text{ DM} \\ \text{=====}$$

18. gegeben:

gesucht:

$$P = 1000 \text{ W}$$

$$\vartheta_2 = ?$$

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$\vartheta_1 = 14^\circ \text{ C}$$

$$t = 5 \text{ min} = 0,083 \text{ h}$$

$$Q = m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$\vartheta_2 = \frac{Q}{m \cdot c} + \vartheta_1$$

$$Q = K \cdot W \cdot \eta$$

$$W = P \cdot t$$

$$Q = K \cdot P \cdot t \cdot \eta$$

$$\vartheta_2 = \frac{K \cdot P \cdot t \cdot \eta}{m \cdot c} + \vartheta_1$$

$$= \frac{860 \text{ kcal} \cdot 1 \text{ kW} \cdot 0,083 \text{ h} \cdot \text{kg} \cdot \text{grd}}{\text{kWh} \cdot 2 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal}} + 14^\circ \text{ C}$$

$$\vartheta_2 = 33,906 \text{ grd} + 14^\circ \text{ C} \approx 48^\circ \text{ C} \\ \text{=====}$$

19. $P = 11,765 \text{ kW}$

20. Spannungsreihe (Tafel 3)

$$\text{Wismut } E = - 6,5 \text{ mV} / 100 \text{ grd}$$

$$\text{Antimon } E = + 4,8 \text{ mV} / 100 \text{ grd}$$

Urspannung des Thermoelements bei 100 grd Temperatur-differenz

$$E = 11,3 \text{ mV}$$

$$E_{600} = \frac{11,3 \text{ mV}}{100 \text{ grd}} \cdot 600 \text{ grd}$$

$$= 67,8 \text{ mV} \\ \text{=====}$$

21. $Q = 307,192 \text{ kcal}$

Literaturnachweis:

Lehrbriefe für das Fachschulfernstudium:

"Grundlagen der Elektrotechnik"
(für Elektrotechniker)

Lindner, Elektroaufgaben, Band 1: Gleichstrom,
Fachbuchverlag, Leipzig 1958.

Moeller-Wolff, Leitfaden der Elektrotechnik,
Band I.,
B.G. Teubner, Stuttgart 1958.

Schönfeld, Die wissenschaftlichen Grundlagen
der Elektrotechnik,
Hirzel Verlag, Leipzig 1952.

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 3,—

Ag 616/ 314 /62

Best.-Nr. 5030-02/62

III. 9/278

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

GRÄSSLER/HENNIG

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHTELEKTRO- TECHNIKER

3

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAVS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-03/62

Herausgeber:
Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker
Lehrbrief 3
von
Dipl.-Ing. oec. Rolf Gräßler und Dipl.-Gwl. Raimund Hennig
2. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ng 616/ 315 /62

Best.-Nr. 5030-03/62

III,9/278

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
1.6. Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern	3
1.6.1. Allgemeines	3
1.6.2. Grundbegriffe des elektrischen Feldes	4
1.6.2.1. Die elektrische Feldstärke	4
1.6.2.2. Die dielektrische Verschiebung und Verschiebungsdichte	8
1.6.2.3. Der Verschiebungsfluß	14
1.6.2.4. Die Kapazität	16
1.6.3. Schaltungen von Kondensatoren (Kapazitäten)	19
1.6.4. Die Anziehungskraft der Platten	22
1.6.5. Beispiel zur Kraftwirkung des elektri- schen Feldes (Statischer Spannungsmesser)	24
1.6.6. Technische Ausführungsformen von Kondensatoren	25
 1.7. Elektromagnetische Erscheinungen	 31
1.7.1. Allgemeines	31
1.7.2. Grunderscheinungen des magnetischen Feldes	33
1.7.2.1. Magnetisches Feld eines geraden Leiters	33
1.7.2.2. Magnetisches Feld von Leiter- schleifen und Spulen	34
1.7.3. Magnetische Größen	37
1.7.3.1. Der Magnetfluß	38
1.7.3.2. Magnetflußdichte (magnetische Induktion)	39
1.7.3.3. Die magnetischen Spannungs- größen	41
1.7.3.4. Der magnetische Widerstand R_m	43
1.7.3.5. Die magnetische Feldstärke	47
 1.7.4. Das magnetische Feld in Eisen	 54
1.7.4.1. Magnetisierungslinien und magnetische Hysteresis	54
1.7.4.2. Elektromagnete	57
1.7.4.3. Technische Anwendungen von Elektromagneten	59
Antworten auf die Wiederholungsfragen	65
Antworten und Lösungen	69
Literatur-Nachweis	73

1.6. Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern

1.6.1. Allgemeines

Während im Mittelpunkt unserer bisherigen Betrachtungen die Erscheinungen im Leiter und die damit zusammenhängenden Gesetze standen, sollen Sie im ersten Teil dieses Lehrbriefes die wichtigsten elektrischen Erscheinungen und Gesetze in Nichtleitern kennenlernen.

Nichtleiter sind Stoffe, die praktisch keine freien Elektronen, also keine Ladungsträger besitzen und nach den Ihnen bisher bekannten Gesetzen den elektrischen Strom nicht leiten. So hatten wir im Ibf. 1 behauptet, daß das Vakuum und bei nicht zu hoher elektrischer Beanspruchung auch die Luft zu der Gruppe der Nichtleiter zählen. Die wesentlichen Bauteile Ihres Empfängers aber sind die Röhren, die luftleer gepumpt sind. In ihnen fließen elektrische Ströme. Die Rundfunkwellen, die Ihr Gerät empfängt, breiten sich ebenfalls im Nichtleiter Luft aus und sind nichts anderes als elektrische Erscheinungen. Sie sehen, daß es auch in Nichtleitern elektrische Erscheinungen gibt, mit denen wir uns nun in diesem Abschnitt beschäftigen wollen.

Das Schaltelement, von dem die Grundbegriffe auf diesem Gebiet abgeleitet werden sollen, ist der Kondensator. In seinem einfachsten Aufbau besteht er aus zwei Leitern, den Elektroden A und B, die von einem Nichtleiter umgeben sind (Bild 1). Der Kondensator spielt in diesem Abschnitt die gleiche zentrale Rolle wie bei dem bisher kennengelernten Stoff das Ohmsche Schaltelement.

Den in Bild 1 dargestellten Kondensator nennt man auch Plattenkondensator, weil seine

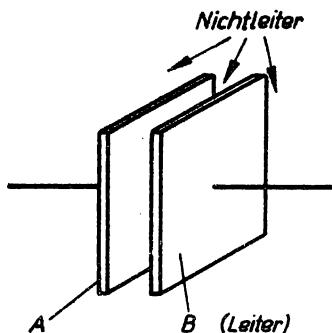


Bild 1: Kondensator

Elektroden Platten sind.

1.6.2. Grundbegriffe des elektrischen Feldes

1.6.2.1. Die elektrische Feldstärke

Wenn man, wie im Bild 2 dargestellt, eine Spannung an die beiden Elektroden des Plattenkondensators legt, dann nehmen die Elektroden jeweils die Ladung des an sie angeschlossenen Pols der Spannungsquelle an. Die am Pluspol der Spannungsquelle liegende Elektrode lädt sich positiv und die am Minuspol liegende Elektrode negativ auf.

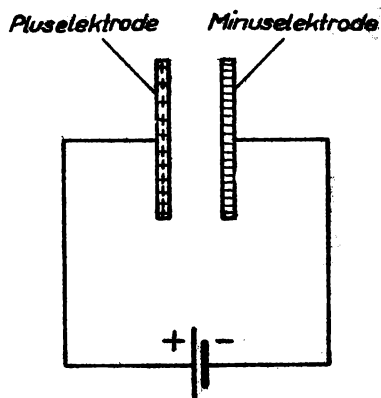


Bild 2: Versuchsanordnung zum Erläutern der Feldstärke

Die Aufladung des Kondensators dauert so lange, bis die Spannung zwischen den Elektroden gleich der der Spannungsquelle ist. Der Raum zwischen den Platten mit dem Abstand a stellt, von einer Platte zur anderen fortschreitend, eine Spannungsabfallstrecke dar. Mißt man die Spannung z.B. zwischen der Minusplatte und gleichmäßig abnehmenden Abständen von der Plusplatte her diesen Raum aus, dann stellt man fest, daß die Spannung linear von der Plusplatte zur Minus-

platte absinkt, ein homogenes Feld vorausgesetzt (Bild 3a und b). Dieser Versuch kann nur als Gedankenexperiment durchgeführt werden, weil es unter normalen Bedingungen (außer im elektrolytischen Trog) nicht möglich ist, Spannungen in Nichtleitern zu messen. Wählt man nicht nur eine Meßstrecke, sondern mehrere und verbindet alle Punkte miteinander, die das gleiche Meßergebnis, also die gleiche Spannung haben, dann erhält man die sogenannten Spannungslinien oder Äquipotentiallinien (Bild 3c).

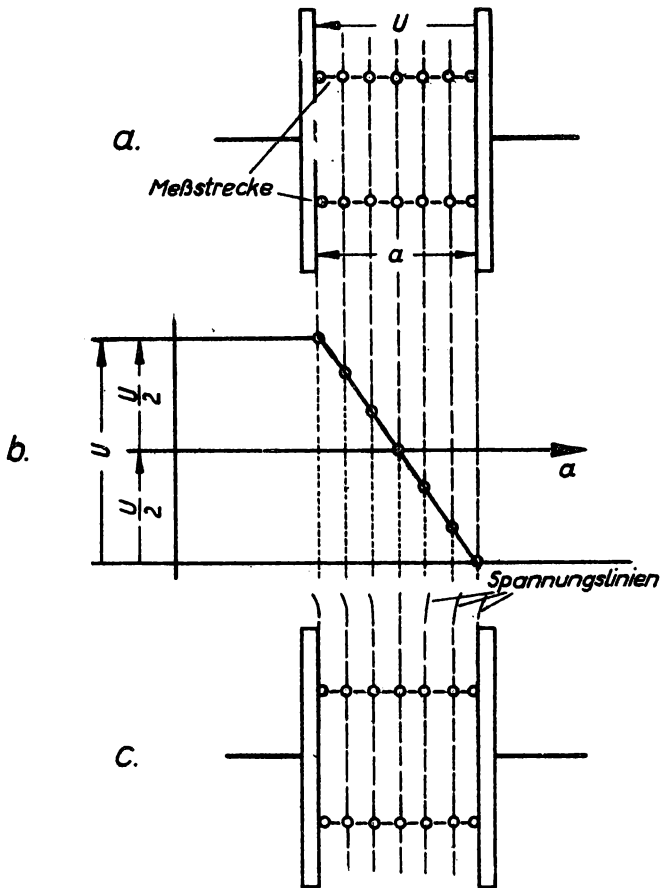


Bild 3 a - c

Wie Sie sehen, liegen die Spannungslinien des Plattenkondensators parallel zu den Elektroden, d.h., daß das Spannungsgefälle im Inneren des Plattenkondensators an allen Punkten, die den gleichen Abstand von der Platte haben, gleich ist.

Bei einem Kondensator bezeichnet man den Raum, in dem man ein Spannungsgefälle feststellen kann, als elektrisches Feld. Man kann das elektrische Feld sichtbar machen. Man klebt dazu auf eine isolierende Platte zwei Stanniolstreifen (Elektroden),

Wenn eine hohe Spannung liegt. Streuen wir auf die Isolierplatte pulverisierte Glaswolle, dann ordnet sich der Staub zu Linien, die zwischen den Metallstreifen parallel zueinanderlaufen. An den Enden aber weichen sie bogenförmig in den freien Raum aus. Man nennt diese Linien elektrische Feldlinien (Bild 4) und den von diesen Linien durchzogenen Raum elektrisches Feld.

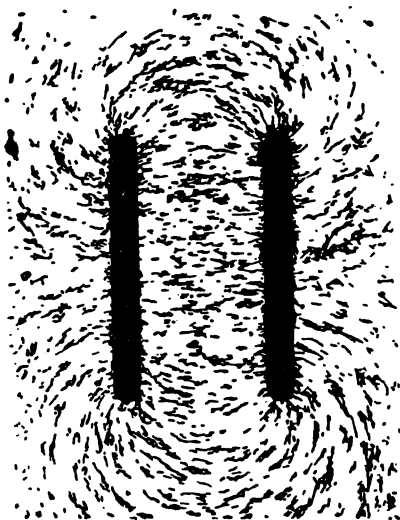


Bild 4: Feldlinien eines geladenen Plattenkondensators

Die elektrischen Feldlinien haben u.a. folgende Eigenschaften:

- a) Die Feldlinien beginnen an der positiven und enden an der negativen Elektrode, haben also Anfang und Ende. (Dieser Richtungssinn ist willkürlich festgelegt worden.)
- b) Die Feldlinien treten stets senkrecht aus der positiven Elektrodenoberfläche aus und enden ebenfalls senkrecht an der negativen Elektrodenoberfläche.

Um eine Aussage über die Stärke des elektrischen Feldes machen zu können,

hat man die elektrische Feldstärke \mathcal{E} eingeführt.

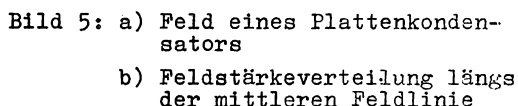
Wenn zwischen zwei 1 cm voneinander entfernten Punkten einer bestimmten Feldlinie eine Spannung von 1 V besteht, beträgt die Feldstärke $1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$.

! einem Plattenkondensator läßt sich die elektrische Feldstärke \mathcal{E} leicht berechnen. Betrachten Sie dazu das Bild 5a!

Die Definition der Feldstärke im Plattenkondensator lautet:

Die Einheit der elektrischen Feldstärke aus der Definitionsgleichung:

Das Bild 5 zeigt Ihnen, wie Sie auch aus der Gleichung (1) ableiten können, daß im Innern eines Plattenkondensators die Feldstärke immer gleich ist, weil die Feldlinien dort eine Gerade zwischen den beiden Elektroden darstellen. Vergleichen Sie dazu auch das Bild 3b, aus dem Sie das lineare Spannungsgefälle im Innern eines Plattenkondensators erkennen können!



Lehrbeispiel 1

Welche Feldstärke \mathcal{E} besteht zwischen den Platten eines Kondensators, wenn die an den Elektroden liegende Spannung 500 V und der Elektrodenabstand 1,5 mm beträgt?

Lösung :

Gegeben: $U = 500 \text{ V}$ gesucht: $\mathcal{E} = ?$
 $a = 1,5 \text{ mm}$

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

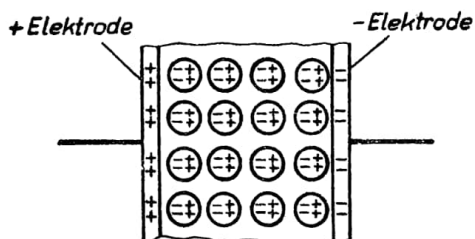
$$\mathcal{E} = \frac{500 \text{ V}}{0,15 \text{ cm}} = 3\,333 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

1.6.2.2. Die dielektrische Verschiebung und Verschiebungsdichte

Den Nichtleiter, der die beiden Elektroden des Plattenkondensators umschließt, bezeichnet man auch als Dielektrikum. Da alle Nichtleiter im Idealfall keine freien Elektronen besitzen, kann ein Elektrizitätstransport zwischen den beiden Elektroden, also durch das Dielektrikum, nicht stattfinden. Wie Sie aber gesehen haben, ist eine Beeinflussung des Dielektrikums durch das elektrische Feld nachzuweisen (Feldlinien). Man kann sich die Vorgänge im Dielektrikum wie folgt vorstellen:

Wirkt kein elektrisches Feld auf das Dielektrikum ein, dann besteht es aus elektrisch neutralen Molekülen (jedes Molekül besteht aus einzelnen Atomen, die ebenfalls elektrisch neutral sind). Legt man eine Spannung an die beiden Elektroden des Plattenkondensators (es entsteht ein elektrisches Feld), dann bleiben die Moleküle als Ganzes elektrisch neutral, jedoch verschieben sich im Molekül die elektrischen Ladungen (die sogenannten Molekularladungen), so daß die einzelnen Moleküle polarisiert werden. Es werden umso mehr Ladungsträger nach den Molekülseiten abgedrängt, je stärker das elektrische

Feld und damit die elektrische Feldstärke \mathcal{E} wird (Bild 6). Beachten Sie bei den polarisierten Molekülen, daß jedes Molekül zwei entgegengesetzt gleiche Ladungen trägt.



Steigert man die Spannung an den Elektroden des Plattenkondensators, erhöht man demnach die elektrische Feldstärke \mathcal{E} , dann werden die Ladungen aus den Molekülen herausgerissen und bewegen sich frei im Raum des elektrischen Feldes, meist von der einen Kondensatorelektrode zur anderen. In diesem Fall entsteht eine leitende Verbindung zwischen den beiden Elektroden; das Dielektrikum (Nichtleiter) ist durch Erhöhen der Feldstärke \mathcal{E} zum Leiter geworden. Allgemein bezeichnet man diesen Vorgang, der das Dielektrikum zu einem Leiter werden läßt, als einen Durchschlag. Wenn die leitende Verbindung durch die Luft erfolgt, spricht man von einem Überschlag. Bild 7 zeigt einen Überschlag über eine Reihe von Kappenisolatoren. Hierbei wirken als Elektroden oben die geerdete Aufhängevorrichtung und unten die Hochspannungsleitung, als Dielektrikum die dazwischenliegende Luft.

Bild 6: Schema zur dielektrischen Verschiebung

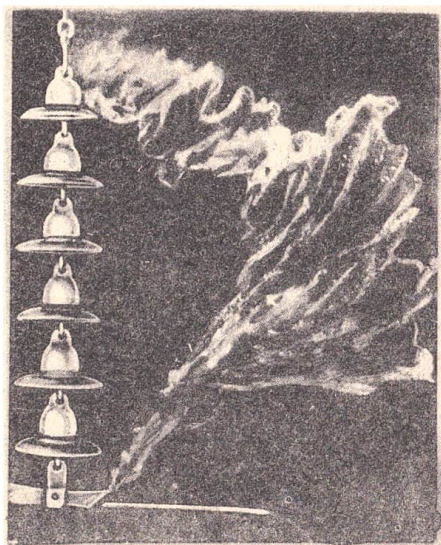


Bild 7: Überschlag an einer Isolatorenkette

Aus Bild 8 ersieht man die Wirkung eines Durchschlags durch ein Porzellanrohr. Dieses Rohr diente als Durchführung für eine Hochspannungsleitung (eine Elektrode war bei dieser Anordnung die hindurchführende Hochspannungsleitung und die andere die an das Porzellanrohr angrenzende Hauswand).

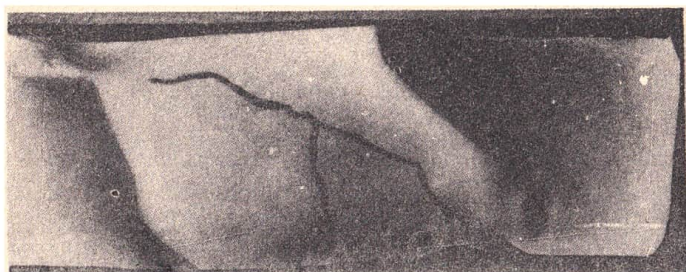


Bild 8: Durchschlagkanal bei einer Porzellandurchführung

Wie Sie wissen, werden umso mehr Ladungsträger nach den Molekülseiten abgedrängt, je mehr die Feldstärke steigt. Das Abdrängen oder auch Verschieben der Ladungsträger innerhalb der Moleküle bezeichnet man als dielektrische Verschiebung. Sie ist der Feldstärke \mathcal{E} proportional. Um eine Aussage über die Größenordnung der dielektrischen Verschiebung machen zu können, hat man die Verschiebungsdichte \mathcal{D} (deutsch D) eingeführt.

Die Verschiebungsdichte \mathcal{D} , die Verschiebungsladung je cm^2 gemessen in $\frac{\text{As}}{\text{cm}^2}$, ist proportional einer Materialkonstanten und der Feldstärke \mathcal{E} .

$$\mathcal{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathcal{E} \quad (2)$$

ϵ_0 und ϵ_r (griechisch: klein Epsilon) sind Konstanten.

ϵ_0 ist eine Maßkonstante, man bezeichnet sie auch als Dielektrizitätskonstante des Vakuums.

ϵ_r ist eine Materialkonstante, die angibt, welche Ladungsverschiebung in dem bestimmten Dielektrikum im Verhältnis zum Vakuum erfolgt. Man bezeichnet sie als relative

Dielektrizitätskonstante. Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r ist ein Vielfaches der Dielektrizitätskonstanten

ϵ_0 des Vakuums, sie gibt den Einfluß des Werkstoffes an, der sich im elektrischen Feld befindet. Wird für das Vakuum die relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 1$ gesetzt, dann gilt z.B. für Porzellan $\epsilon_r = 5,4$. Luft weicht so wenig vom Vakuum ab, daß man es dem Vakuum gleichsetzt. Die Ladungsverschiebung in Porzellan ist nach Gleichung (2) bei gleicher Feldstärke 5,4 mal größer als in Luft.

Nach dieser Feststellung gilt die Gleichung (2) für das Dielektrikum Vakuum und Luft in folgender Form (ϵ_r ist eine dimensionslose Größe):

$$\mathcal{V} = \epsilon_0 \cdot \mathcal{E}$$

nach ϵ_0 aufgelöst:

$$\epsilon_0 = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{E}}$$

Die Dielektrizitätskonstante des Vakuums ϵ_0 gibt an, welche Verschiebungsladung je cm^2 (Verschiebungsdichte \mathcal{V}) durch eine Feldstärke $\mathcal{E} = 1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ im Vakuum bzw. in der Luft hervorgerufen wird.

Die Einheit der Verschiebungsdichte \mathcal{V} ist $\frac{\text{As}}{\text{cm}^2}$ oder Coulomb je cm^2 ($= \frac{\text{C}}{\text{cm}^2}$).

Um den Zahlenwert von ϵ_0 zu erhalten, muß man feststellen, welche Ladungsverschiebung je cm^2 (Verschiebungsdichte \mathcal{V}) von 1 V je cm (Feldstärke \mathcal{E}) in einem Plattenkondensator mit dem Dielektrikum Luft oder Vakuum hervorgerufen wird.

Als Ergebnis erhält man

die Maßzahl der Dielektrizitätskonstanten des Vakuums
 $\epsilon_0 = 0,0886 \cdot 10^{-12}$.

Die Einheit der Dielektrizitätskonstanten des Vakuums ϵ_0 ermittelt man, indem man die Gleichung (2) in der für das Vakuum gültigen Form nach ϵ_0 auflöst und nur die entsprechenden Einheiten einsetzt:

$$[\epsilon_0] = \frac{[Q]}{[V]}$$

$$[\epsilon_0] = \frac{\frac{As}{cm^2}}{\frac{cm}{V}} = \frac{As}{cm^2} \cdot \frac{cm}{V} = \frac{As}{V} \cdot \frac{1}{cm}$$

Zur Abkürzung kann man für

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

setzen. Auf diese Einheit wird noch in dem Abschnitt "Kapazität" eingegangen.

Die Einheit der Dielektrizitätskonstanten des Vakuums ϵ_0 ist

$$\text{Farad pro cm} = \frac{F}{cm}$$

Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\epsilon_0 = 0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{F}{cm}$
--

Aus der Tafel 1 ersehen Sie die relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r von einigen Stoffen (die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r ist nur eine Verhältniszahl und besitzt daher keine Dimension):

Tafel 1
Dielektrizitätskonstanten verschiedener Stoffe

Werkstoff	relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r	Werkstoff	relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r
Azeton	21,5	Petroleum	2,1
Basalt	9	Phenolpreßharz	4 ... 5
Benzol	2,25	Phosphor	4,1
Diamant	16,5	Polystyrol	2,6
Eis bei -20^0 C	16,0	Quarz	3,8 ... 5
Epsilan 7000	7000	Schellack	3,1
Glas	5 ... 7	Schiefer	6 ... 10
Glimmer	5 ... 8	Wasser dest.	80
Gummi	2,7	Zellulose	6,6
Hartpapier	5 ... 6		

Werkstoff	relative Dielektrizitäts- konstante ϵ_r	Werkstoff	relative Dielektrizitäts- konstante ϵ_r
Kabelisolation		Keramische <u>Massen</u>	
Starkstromkabel	4,3	Hartporzellan	5,0
Fernmeldekabel	1,6	Steatit	5,5
Marmor	8,3	Frequenta,	
Mikalex	7 ... 8	Calit, Calan,	
Mikanit	4,5 ... 5,5	Ultracalan,	
Papier	1,8 ... 2,6	Kerafar, Kondensa C und F	60
Paraffin	2,1 ... 2,2	Kondensa N	40
Pertinax	4,8		

Lehrbeispiel 2

Wie groß ist die Verschiebungsdichte im Dielektrikum eines Plattenkondensators, wenn an den Elektroden des Kondensators eine Spannung von 500 V anliegt und als Dielektrikum Kondensa N mit der relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r = 40$ verwendet wurde, das in einer Stärke von 5 mm zwischen den Elektroden des Kondensators liegt?

Lösung :

Gegeben: $U = 500 \text{ V}$

Gesucht: $\mathcal{D} = ?$

$$\epsilon_r = 40$$

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$\mathcal{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

$$\mathcal{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{U}{a} = 0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vcm}} \cdot 40 \cdot \frac{500 \text{ V}}{0,5 \text{ cm}}$$

$$\mathcal{D} = 3544 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{cm}^2}$$

1.6.2.3. Der Verschiebungsfluß

Im vorhergehenden Abschnitt lernten Sie die Verschiebungsdichte \mathcal{D} kennen, die angibt, welche Ladung sich zwischen den Elektroden eines Kondensators im Dielektrikum auf einer Fläche von 1 cm^2 verschiebt. Will man nicht die Ladung ermitteln, die pro cm^2 verschoben wird, sondern die gesamte Verschiebungsladung zwischen den beiden Elektroden des Kondensators, dann muß man die Verschiebungsdichte \mathcal{D} mit der Gesamtfläche einer Kondensatorplatte multiplizieren:

$$\text{Verschiebungsladung} \quad \boxed{Q = \mathcal{D} \cdot A} \quad (3)$$

Unter der Verschiebungsladung Q eines Kondensators versteht man die Ladung, die durch Anlegen einer Spannung an die Elektroden eines Kondensators über die gesamte Fläche verschoben wird.

Die Gleichung (3) gilt aber nur unter der Voraussetzung, daß die Feldstärke \mathcal{E} über die gesamte Fläche des Kondensators konstant ist. In diesem Falle spricht man dann auch von einem homogenen Feld. Sind die Platten eines Plattenkondensators im Verhältnis zu ihrem Abstand sehr groß und betrachtet man nicht die Feldlinien am Plattenrand, dann kann man von einem homogenen Feld sprechen, bei dem die Feldstärke über die Fläche A konstant ist.

Den Vorgang der Ladungsverschiebung kann man auch wie folgt darstellen:

Beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden eines Kondensators fließt der einen Platte eine positive Ladung $+Q$ zu, während von der zweiten Platte eine gleich große Ladung zur Spannungsquelle zurückfließt. Wenn der einen Elektrode eine Ladung zu- und von der anderen Elektrode eine abfließt, muß zwischen den beiden Elektroden eine Verbindung sein, die die Ladung transportieren kann. Diese Aufgabe übernimmt das Dielektrikum, das durch die Verschiebungsladung an der Plus Elektrode die Ladung Q aufnimmt und an die Minus-Elektrode abgibt. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als Verschiebungsfluß.

Unter dem Verschiebungsfluß versteht man das Transportieren einer Ladung im Dielektrikum.

Stellt man den Verschiebungsfluß durch Linien dar, dann quellen aus der +Platte ebensoviel Verschiebungslinien wie in die -Platte münden; die Zahl der Verschiebungslinien ist über das gesamte Dielektrikum konstant (Bild 9).

Die Einheit der Verschiebungsladung Q ist gleich der Ihnen bereits bekannten Einheit der Ladung. Sie kann auch aus der Gleichung (3) abgeleitet werden:

$$[Q] = [\mathcal{V}] \cdot [A]$$

Einheit der Verschiebungsladung

$$\begin{aligned} [Q] &= \frac{\text{As}}{\text{cm}^2} \cdot \text{cm}^2 \\ &= \text{As (Amperesekunden)} \end{aligned}$$

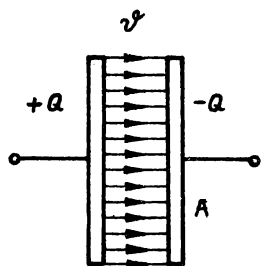


Bild 9

Lehrbeispiel 3

Berechnen Sie die Verschiebungsladung im Dielektrikum eines Plattenkondensators! An den Platten liegt eine Spannung von 700 V, der Plattenabstand beträgt 8 mm, die Plattenfläche $A = 30 \text{ cm}^2$, die relative Dielektrizitätskonstante des verwendeten Dielektrikums Kondensa N $\epsilon_r = 40$.

Welche Ladung nimmt der Plattenkondensator auf?

Lösung :

Gegeben: $U = 700 \text{ V}$

Gesucht: Q

$a = 0,8 \text{ cm}$

$A = 30 \text{ cm}^2$

$\epsilon_r = 40$

Verschiebungsladung $Q = \mathcal{V} \cdot A$

$$\mathcal{V} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{U}{a} \cdot A \\
 &= 0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{cm}} \cdot 40 \cdot \frac{700 \text{ V}}{0,8 \text{ cm}} \cdot 30 \text{ cm}^2 \\
 &= 0,0930 \cdot 10^{-6} \text{ F V}
 \end{aligned}$$

(Wie Ihnen bekannt ist, kann man $\frac{\text{As}}{\text{V}}$ für F setzen.)

$$\begin{aligned}
 &= 0,0930 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{V}} \\
 Q &= 0,0930 \cdot 10^{-6} \text{ As} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

1.6.2.4. Die Kapazität

Wie Sie bereits wissen, verschieben sich die Ladungen der einzelnen Moleküle des Dielektrikums eines Kondensators beim Anlegen einer Spannung an die beiden Elektroden. Die Verschiebungsladung hatten wir durch die Gleichung (3) berechnet:

$$Q = \varrho \cdot A$$

Trennt man den Kondensator von seinen Spannungszuführungen, dann kann die Verschiebungsladung Q des Dielektrikums nicht entweichen, sie bleibt bestehen; der Kondensator ist geladen. Durch die Verschiebungsladung Q ist es möglich, im Kondensator Elektrizitätsmengen zu speichern.

Der Kondensator ist ein Speicher von Elektrizitätsmengen.

Es soll dazu folgendes Experiment beschrieben werden: Einen Plattenkondensator, dessen Dielektrikum aus Luft besteht, lädt man mit einer Spannung U auf. Das Aufladen kann man durch ein statisches Voltmeter (ein auf der Kraftwirkung der Spannung beruhendes Voltmeter, durch das kein Strom fließt) nachweisen. Der gleiche Ausschlag des Voltmeters bleibt auch nach dem Abtrennen der Spannungsquelle erhalten. Betrachten Sie das Bild 10!

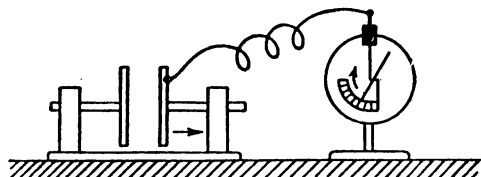


Bild 10: Versuchsanordnung zur Kapazität

Der Plattenkondensator ist bei diesem Versuch so gebaut, daß sich die Platten verschieben lassen, d.h. der Plattenabstand ~~ver~~ändert werden kann. Wenn man die Platten auseinanderzieht, dann ist an dem statischen Voltmeter eine höhere Spannung abzulesen. Schiebt man dagegen die Platten zusammen, dann sinkt die Spannung. Wie Sie wissen, bleibt aber die im Kondensator gespeicherte Ladungsmenge Q (Verschiebungsladung) konstant, weil sie nicht entweichen kann. Es muß somit eine weitere Größe vorhanden sein, die eine bei Veränderung des Plattenabstandes sich ändernde Eigenschaft des Kondensators charakterisiert. Diese Größe ist die Kapazität C oder Speicherfähigkeit des Kondensators.

Die Kapazität C ist die den Kondensator kennzeichnende Schaltungsgröße, wie der Widerstand R das Ohmsche Schaltelement charakterisiert.

Der formelmäßige Ausdruck der Kapazität ergibt sich, wenn man die Ladung eines Kondensators mit Hilfe der bekannten Beziehungen durch die Spannung ausdrückt:

$$Q = \varphi \cdot A$$

$$\varphi = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

$$\varphi = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{U}{a}$$

$$Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{U}{a} \cdot A$$

$$\text{oder } Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{a} \cdot U$$

Hierbei bezeichnet man den Ausdruck

$$\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{a} = C$$

Definitionsgleichung der Kapazität (4)

als Kapazität des Kondensators. Nun können Sie auch verstehen, daß bei gleichbleibender Ladung Q und bei größer werdendem Abstand (, eine Verkleinerung der Kapazität C bedeutet) die

Spannung U steigen muß (siehe letzte Zeile der Ableitung).
Die Gleichung (4) in die vorhergehende Gleichung eingesetzt,
ergibt

$$Q = C \cdot U \quad (5)$$

Aus den nun gewonnenen Erkenntnissen kann man die Versuchsergebnisse nach Bild 10 wie folgt erklären:

Bei größer werdendem Plattenabstand a sinkt die Kapazität C ,
wodurch bei gleichbleibender Ladung Q die Spannung steigt.
Die Einheit der Kapazität C läßt sich aus der Gleichung (5)
ableiten, indem man sie nach C auflöst und statt der Größen
nur die Einheiten einsetzt:

$$[C] = \frac{Q}{U} = \frac{As}{V} = F \text{ (Farad)}$$

Daß man statt $\frac{As}{V}$ die Einheit F (Farad) einsetzen kann, haben
Sie bereits im Abschnitt 1.6.2.2. gelernt.

Ein Kondensator hat die Kapazität von $1 F$ (Farad), wenn er
bei einer Spannung von $1 V$ eine Ladung von $1 As$ speichern
kann.

Um die Rechnung zu vereinfachen, wendet man, da $1 F$ ein in der
Praxis unerreichbar großer Wert ist, entsprechende Unterein-
heiten an:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mikروفarad} &= 1 \mu F = 10^{-6} F \\ 1 \text{ Nanofarad} &= 1 nF = 10^{-9} F \\ 1 \text{ Pikofarad} &= 1 pF = 10^{-12} F \end{aligned}$$

L e h r b e i s p i e l 4

Welche Kapazität besitzt ein Kondensator, der bei einer Span-
nung von $250 V$ eine Ladung von $5 \cdot 10^{-4} As$ aufnimmt?

L ö s u n g :

Gegeben: $U = 250 V$

Gesucht: $C = ?$

$$Q = 5 \cdot 10^{-4} As$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{U} = \frac{5 \cdot 10^{-4} As}{250 V} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{As}{V} \\ &= 2 \cdot 10^{-6} F \\ &= 2 \mu F \\ &==== \end{aligned}$$

1.6.3. Schaltungen von Kondensatoren (Kapazitäten)

Kondensatoren lassen sich genau wie die Ohmschen Schaltelemente in Reihe und parallel schalten.

a) Parallelschaltung von Kondensatoren

Betrachten Sie dazu das Bild 11! Mehrere parallelgeschaltete Kondensatoren lassen sich durch einen Kondensator ersetzen, wenn folgende Bedingungen gewährleistet sind:

Bei parallelgeschalteten Kondensatoren ist die Spannung an allen Kondensatoren gleich groß. Die Spannung U_1 an der Kapazität C_1 ist gleich der Spannung U_2 an der Kapazität C_2 usw. und damit auch gleich der Spannung U an der Ersatzkapazität C_{ers} .

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$$

Bei der Parallelschaltung von mehreren Kondensatoren addieren sich deren Ladungen:

Q_1 des Kondensators C_1 und die Ladung Q_2 des Kondensators C_2 usw. zur Ladung Q des Kondensators C_{ers} .

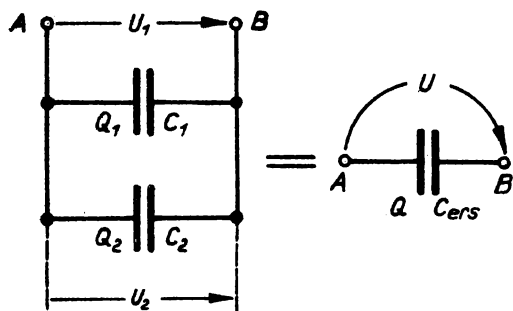


Bild 11: Parallelschaltung von mehreren Kondensatoren

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q$$

Nach der Gleichung (5) kann man für die Ladung Q auch schreiben

$$Q = C \cdot U$$

Es gilt demnach:

$$C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + \dots + C_n \cdot U = C_{\text{ers}} \cdot U$$

Diese Gleichung mit U gekürzt ergibt:

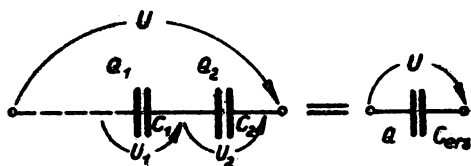
$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = C_{\text{ers}} \quad (6)$$

Schaltet man mehrere Kondensatoren parallel, dann addieren sich deren Kapazitäten C .

b) Reihenschaltung von Kondensatoren

Betrachten Sie dazu das Bild 12!

Bei der Reihenschaltung von mehreren Kondensatoren ist die



Spannung an den einzelnen Kondensatoren nicht gleich der Spannung an den Klemmen des Ersatzkondensators, sondern die Summe der Spannungsabfälle über den einzelnen Kondensatoren ist gleich der Spannung am Ersatzkondensator.

Bild 12: Reihenschaltung von Kondensatoren

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U$$

Die Ladung (Verschiebungsladung) ist dagegen bei allen Kondensatoren gleich

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$$

Löst man die Gleichung (5)

$$Q = C \cdot U$$

nach U auf

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

und setzt statt U die Größe $\frac{Q}{C}$ in die Gleichung

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U$$

ein, dann erhält man

$$\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n} = \frac{Q}{C_{\text{ers}}}$$

und kürzt die Gleichung mit Q

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{1}{C_{\text{ers}}}$$

oder auch

$$C_{\text{ers}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (7)$$

Schaltet man mehrere Kondensatoren in Reihe, dann ist der reziproke Wert der Kapazität des Ersatzkondensators gleich der Summe der reziproken Werte der Kapazität der einzelnen Kondensatoren.

Vergleichen Sie diesen Abschnitt mit dem Abschnitt Gegenüberstellung der Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen im zweiten Lehrbrief! Welcher Unterschied besteht zwischen den Gleichungen für das Zusammenschalten von Widerständen und Kondensatoren?

Lehrbeispiel 5

Drei Kondensatoren von je $4 \mu\text{F}$ Kapazität sollen in Reihe geschaltet werden. Welche Kapazität C_{ers} hat diese Schaltungsanordnung?

Lösung:

Gegeben: $C_1 = 4 \mu\text{F}$

Gesucht: $C_{\text{ers}} = ?$

$n = 3$

Reihenschaltung

$$\begin{aligned} C_{\text{ers}} &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{4\mu\text{F}} + \frac{1}{4\mu\text{F}} + \frac{1}{4\mu\text{F}}} = \frac{1}{0,25 \frac{1}{\mu\text{F}} + 0,25 \frac{1}{\mu\text{F}} + 0,25 \frac{1}{\mu\text{F}}} \\ &= \frac{1}{0,75 \frac{1}{\mu\text{F}}} = 1,33 \mu\text{F} \end{aligned}$$

1.6.4. Die Anziehungskraft der Platten

Dem Kondensator fließt beim Aufladen eine Ladung Q zu, die Spannung steigt dabei im Kondensator von 0 auf U , es ist also eine Arbeit von

$$W = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q$$

notwendig.

Wenn man $C \cdot U$ statt Q in die Gleichung einsetzt, dann erhält man:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (8)$$

Im Abschnitt 1.6.2.4. bei der Ableitung der Kapazität haben wir den in Bild 10 dargestellten Versuch beschrieben. Für unsere jetzige Betrachtung ist die Wiederholung folgender Erscheinung wichtig:

Ein Kondensator hat beim Anlegen an eine Spannungsquelle eine Ladung Q aufgenommen, die auch nach dem Abtrennen von der Spannungsquelle erhalten bleibt. Legt man an die Elektroden des Kondensators ein statisches Voltmeter und zieht die Elektroden weiter auseinander, leistet also eine Arbeit, dann steigt die durch das statische Voltmeter angezeigte Spannung an.

Fassen wir das Ergebnis noch einmal zusammen:

Die Ladungsmenge Q bleibt beim Verändern des Plattenabstandes immer konstant. Beim Auseinanderziehen der Elektroden steigt die Spannung U , beim Zusammenschieben sinkt die Spannung U .

Vergleichen wir diese Feststellung mit der Gleichung der gespeicherten Arbeit in einem Kondensator:

$$W = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q$$

Wenn Q konstant bleibt aber die Spannung U beim Auseinanderziehen ansteigt, dann steigt auch die im Kondensator gespeicherte Arbeit W an, weil sie der Ladungsmenge Q und der Spannung U proportional ist. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie bleibt die Energiemenge in einem abgeschlossenen System aber immer konstant. Es muß zwischen den Elektroden

eine Anziehungskraft bestehen, die durch die aufgewendete Arbeit beim Auseinanderziehen überwunden wird. Der Plattenkondensator mit dem Abstand a_1 soll durch Aufladen an einer Spannungsquelle die Arbeit W_1 aufgenommen haben. Durch das Auseinanderziehen der Elektroden auf den Abstand $a_2 = 2 a_1$ ist eine Arbeit von $F \cdot a_1$ (Kraft \cdot Weg), ohne Berücksichtigung von Reibungsverlusten, notwendig gewesen. Es gilt:

Energieinhalt des Kondensators vor dem Auseinanderziehen:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

Energieinhalt des Kondensators nach dem Auseinanderziehen:

$$W_2 = 2 W_1 = F \cdot a_1 + W_1$$

Nach dem Gesetz: Aktio = Reaktio ist die aufgewendete Kraft zum Auseinanderziehen der Platten genau so groß wie die Anziehungskraft der Platten, aber e n t g e g e n g e s e t z t gerichtet; man muß beim Berechnen der Anziehungskraft das Vorzeichen vertauschen.

Will man die Kraft F berechnen, mit der sich die Platten eines Kondensators anziehen, dann gilt

$$W_1 = - (F \cdot a_1)$$

$$F = \frac{W_1}{a_1}$$

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (8)$$

$$F = \frac{C \cdot U^2}{2 a_1}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a} \quad (4)$$

$$F = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 a^2} \quad (9)$$

Lehrbeispiel 6

Wie groß ist die Anziehungskraft zweier Kondensatorplatten von $A = 50 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm}$ bei einer Spannung von 1000 V und einem Plattenabstand von 2 mm in Luft ($\epsilon_r = 1$)?

L ö s u n g :

Gegeben: A = 50 mm · 50 mm

Gesucht: F = ?

U = 1000 V

a = 2 mm

$\epsilon_r = 1$

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 a^2} \quad (9) \\
 &= \frac{0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{F}{cm} \cdot 1 \cdot 25 \text{ cm}^2 \cdot (1000 \text{ V})^2}{2 \cdot (0,2 \text{ cm})^2} \\
 &= 2,77 \cdot 10^{-5} \frac{F \text{ V}^2}{cm} = 2,77 \cdot 10^{-5} \frac{As \text{ V}}{cm} \\
 &= 2,77 \cdot 10^{-5} \frac{Ws}{cm}
 \end{aligned}$$

Umrechnung von elektrischer Arbeit in mechanische Arbeit
(Lbf. 2):

$$1 \text{ Ws} = 0,102 \text{ kpm} = 10,2 \text{ kpcm}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 2,77 \cdot 10^{-5} \frac{Ws}{cm} \cdot 10,2 \frac{kpcm}{Ws} \\
 &= 2,83 \cdot 10^{-4} \text{ kp} \\
 &= 0,283 \text{ p} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

Sie sehen aus diesem Lehrbeispiel, daß die Anziehungskräfte zwischen zwei Platten eines Kondensators sehr klein sind.

1.6.5. Beispiel zur Kraftwirkung des elektrischen Feldes (Statischer Spannungsmesser)

Sie wissen aus dem vorhergehenden Abschnitt, daß die Platten eines Kondensators einander mit der Kraft

$$F = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 a^2} \quad (9)$$

anziehen. Wie Sie aus dieser Gleichung sehen, steigt die Anziehungskraft F mit dem Quadrat der Spannung (U^2). Diese Er-

scheinung macht man sich bei den sogenannten "nicht-stromverbrauchenden" Spannungsmessern, die Sie im Lbf. 1 schon kennengelernt haben, zunutze. Am häufigsten wird das Multizellular-Voltmeter benutzt, bei dem man die Fläche A des Kondensators durch Parallelschalten mehrerer einzelner Elektroden (als Dielektrikum dient Luft) möglichst groß macht. Dadurch kann man auch bei einer kleineren Spannung eine größere Kraftwirkung und damit einen sichtbaren Ausschlag des Zeigers erreichen (Bild 13).

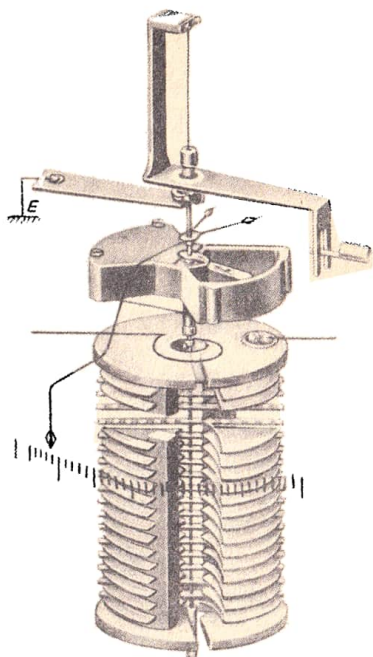


Bild 13: Multizellular-Voltmeter

1.6.6. Technische Ausführungsformen von Kondensatoren

Bei den Kondensatoren unterscheidet man zwischen zwei Gruppen:

- a) den Festkondensatoren und
- b) den veränderbaren Kondensatoren.

a) Festkondensatoren

Als Dielektrikum bei Festkondensatoren werden u.a. folgende Stoffe verwendet:

Glimmer
 Keramik (Kondensa) und
 Papier
 Epsilon

Glimmerkondensatoren:

Auf Glimmerplatten, die eine sehr große Durchschlagfestigkeit

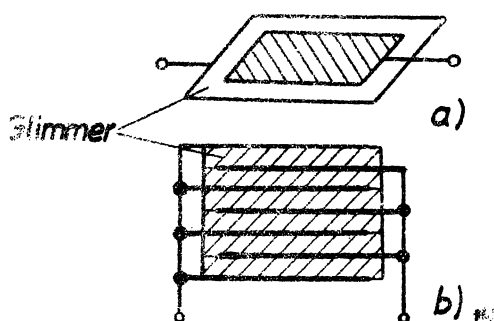


Bild 14: Glimmerkondensator

besitzen, preßt oder dampft man leitende Beläge als Elektroden auf. Zur Erhöhung der Kapazitätswerte können mehrere Glimmerplatten, die jeweils mit ihren beiden Elektroden einen fertigen Kondensator darstellen, übereinandergeschichtet und parallelgeschaltet werden (Bild 14).

Keramikkondensatoren:

Bei den Keramikkondensatoren dienen als Dielektrikum keramische Massen mit einer sehr hohen Dielektrizitätskonstanten

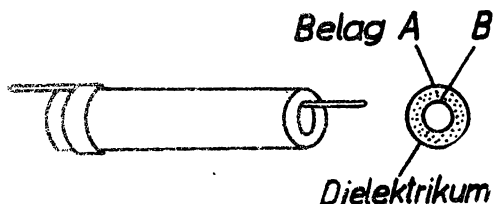


Bild 15: Keramikkondensator

(Frequenta, Kerafar, Kondensa usw.). Sie haben meist die Form von Zylinderschermkondensatoren (Bild 15) und finden in der Schwachstromtechnik für kleine Kapazitäten Verwendung.

Papierkondensatoren:

Als Dielektrikum in Papierkondensatoren verwendet man ölgetränktes Papier und als Elektroden dünne Aluminiumfolien und rollt sie zu Wickeln zusammen (Bild 16).

Elektrolytkondensatoren:

Wie der Name sagt, spielt bei dieser Kondensatorenart ein Elektrolyt eine wichtige Rolle, z.B. eine wässrige Lösung von Borax und Boraxsäure, neuerdings auch Adipinsäure. Als Elektroden verwendet man vielfach Aluminiumfolien. Beim Anlegen

einer Spannung überzieht sich wegen des Elektrolyts die positive Elektrode mit einer dünnen $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Schicht, die als Dielektrikum dient. Bei den Elektrolytkondensatoren ist auf die richtige Polung der angelegten Spannung zu achten, da sonst die an der positiven Elektrode aufgebaute dünne $\text{Al}(\text{OH})_3$ -Schicht, das Dielektrikum, abgebaut wird (Bild 17).

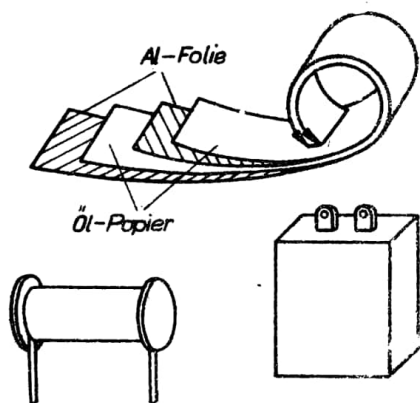


Bild 16: Papierkondensator

b) Veränderbare Kondensatoren

Die häufigste Form des veränderbaren Kondensators ist der Drehkondensator, dessen Dielektrikum meist Luft ist, während die Elektroden aus Aluminium bestehen. Die Wirkungsweise des Drehkondensators beruht darauf, daß man ein bewegliches Plattensystem gegen ein festes verdrehen kann. Durch das Ineinanderdrehen der Elektroden (Aluminiumplatten) läßt sich die Fläche und damit die Kapazität des Kondensators verändern (Bild 18). Bei völligem Ineinandergreifen der Plattensysteme ist die Kapazität am größten.

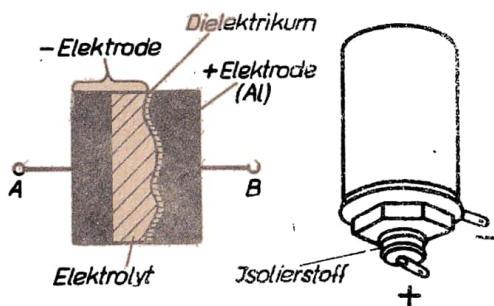


Bild 17: Elektrolytkondensator

Zusammenfassung =====

Der Kondensator besteht in seiner einfachsten Ausführungsform

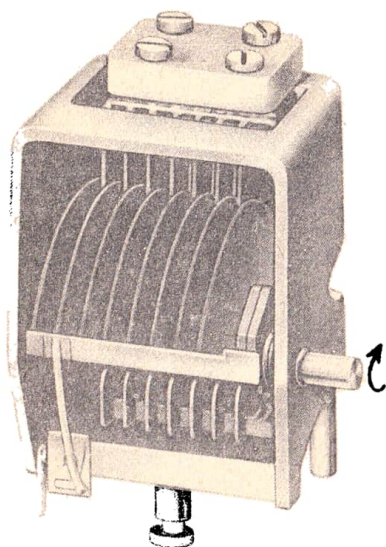


Bild 18: Drehkondensator

aus zwei Elektroden, zwischen denen sich ein Nichtleiter befindet. Zwischen den beiden an einer Spannung liegenden Elektroden breitet sich das elektrische Feld aus. Die Feldstärke \mathcal{E} charakterisiert die Stärke des elektrischen Feldes. Bei einem Plattenkondensator läßt sie sich relativ einfach bestimmen, indem man die an den Elektroden anliegende Spannung durch den Abstand der Elektroden a dividiert:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

Einheit der Feldstärke: $\frac{V}{cm}$

Bedingt durch die Feldstärke verschieben sich in den Molekülen des Dielektrikums die Ladungen, so daß die einzelnen Moleküle polarisiert werden. Die Größe dieser Ladungsverschiebung kennzeichnet die Verschiebungsdichte \mathcal{Q} .

$$\mathcal{Q} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathcal{E}$$

Die Verschiebungsdichte ist der Feldstärke und einer Materialkonstanten proportional.

Die Einheit der Verschiebungsdichte, der Verschiebungsladung pro cm^2 , ist $\frac{As}{cm^2}$.

Unter dem Verschiebungsfluß versteht man die Ladung, die durch Anlegen einer Spannung an die Elektroden eines Kondensators über die gesamte Fläche verschoben wird. Für den Plattenkondensator gilt:

$$Q = \mathcal{Q} \cdot A$$

Die Einheit der Verschiebungsladung Q ist As (Amperesekunden).

Der Kondensator speichert elektrische Energie; die in ihm gespeicherte Ladung ist gleich der Verschiebungsladung Q .

Die in einem Kondensator gespeicherte Ladung kann man auch dem Produkt der an den Elektroden anliegenden Spannung U und der Kapazität C gleichsetzen.

$$Q = C \cdot U$$

Die Kapazität eines Plattenkondensators läßt sich nach der Gleichung

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a}$$

ermitteln. Die Einheit der Kapazität ist $\frac{As}{V} = F = \text{Farad}$.

Kondensatoren lassen sich wie Widerstände in Reihe und parallel schalten.

Für die Parallelschaltung von Kondensatoren gilt:

$$C_{\text{ers}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

für die Reihenschaltung von Kondensatoren

$$C_{\text{ers}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

Die Platten eines Kondensators ziehen einander mit der Kraft

$$F = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 a^2}$$

an. Diese Kraftwirkung des elektrischen Feldes benutzt man u.a. zur stromlosen Spannungsmessung mit dem Multizellular-Spannungsmesser.

Bei der technischen Ausführung von Kondensatoren unterscheidet man zwischen Festkondensatoren (Glimmer-, Papier-, Keramik- und Elektrolytkondensatoren) und veränderlichen Kondensatoren (Drehkondensatoren).

Wiederholungsfragen

1. Worin besteht der Unterschied zwischen der Verschiebungsdichte \mathcal{D} und der Verschiebungsladung Q ?
2. Welche zwei theoretischen Möglichkeiten bestehen bei einem Plattenkondensator mit dem Dielektrikum Luft, die Kapazität C zu verändern?
3. Warum muß beim Elektrolytkondensator unbedingt auf die richtige Polung der angelegten Spannung geachtet werden?
4. Wann spricht man von einem Über- und wann von einem Durchschlag?

Ü b u n g e n

1. An einem Plattenkondensator mit dem Dielektrikum Luft liegt eine Spannungsquelle von 600 V. Bei welchem Plattenabstand findet ein Überschlag von der einen Elektrode zur anderen statt? (Bei einer Feldstärke von 30 kV/cm schlägt das Dielektrikum Luft in einem homogenen Feld durch.)
2. Welche Kapazität C besitzt ein Plattenkondensator und welche Ladungsmenge Q kann er aufnehmen, wenn an ihm eine Spannung von 500 V liegt, seine Plattenoberfläche 81 cm^2 , der Plattenabstand 1 cm beträgt und als Dielektrikum
 - a) Glimmer ($\epsilon_r = 7$),
 - b) Luft ($\epsilon_r = 1$),
 - c) Azeton ($\epsilon_r = 21,5$),
 - d) Kerafar ($\epsilon_r = 60$),
 - e) Epsilan 7000 ($\epsilon_r = 7000$)

dient?

3. Berechnen Sie die Ladungsmenge, die der Elektrolytkondensator eines elektronischen Blitzgerätes aufnimmt! Technische Daten des Kondensators: Arbeitsspannung $U = 500 \text{ V}$, Kapazität $C = 500 \mu\text{F}$.
4. Fünf Kondensatoren, von denen jeder einzelne eine Kapazität

von 2 μF hat, werden in Reihe geschaltet. Welche Kapazität hat diese Schaltungsanordnung?

1.7. Elektromagnetische Erscheinungen

=====

1.7.1. Allgemeines

In dem bisher behandelten Stoff lernten Sie die Grundgesetze in Leitern und Nichtleitern kennen. Zwischen den elektromagnetischen Erscheinungen und den bisher behandelten Vorgängen besteht eine besonders enge Verbindung, die wir in den folgenden Abschnitten näher betrachten wollen.

Im Lbf. 1, Abschnitt 1.1.2., behaupteten wir von den magnetischen Wirkungen des Stromes:

Der elektrische Strom ist immer von einem Magnetfeld begleitet.

Bei der Behandlung der Spannungsquellen (Lbf. 1, 1.2.3.) haben Sie gelernt:

Man kann eine Urspannung durch Schneiden von Kraftlinien eines Magnetfeldes erzeugen.

Aus diesen beiden Tatsachen erkennen Sie, welche enge Verbindung zwischen den elektrischen und den elektromagnetischen Erscheinungen besteht.

Man entdeckte die Erscheinungen des Magnetismus zuerst an dem Magneteisenerz (Ferrit Fe_3O_4), das die Eigenschaft hat, kleine eiserne Gegenstände anzuziehen. Das Wort "Magnet" rührt von dem ersten Fundort von Magneteisenstein, Magnesia in Kleinasien, her.

Heute unterscheidet man bei den Magneten zwischen den Dauermagneten (permanenten Magneten) und den Elektromagneten. Die Magnete ziehen nicht nur Eisen, sondern auch Nickel und Kobalt an.

Hängt man einen Stabmagneten in der Mitte auf, dann dreht er sich mit einem Ende nach Norden. Man bezeichnet dieses Ende

als Nordpol und das entgegengesetzte Ende als Südpol des Magneten. Nach dem Grundgesetz der Magnete (ungleichnamige Pole ziehen einander an, gleichnamige Pole stoßen einander ab) ergibt sich aus dieser willkürlichen Festlegung, daß am geographischen Nordpol der magnetische Südpol liegt. Umgekehrt liegt am geographischen Südpol der magnetische Nordpol. Wenn man einen zweiten Stabmagneten in die Nähe des beweglich aufgehängten Magneten bringt (Bild 19), dann findet man:

Gleichnamige Pole stoßen einander ab,
ungleichnamige Pole ziehen einander an.

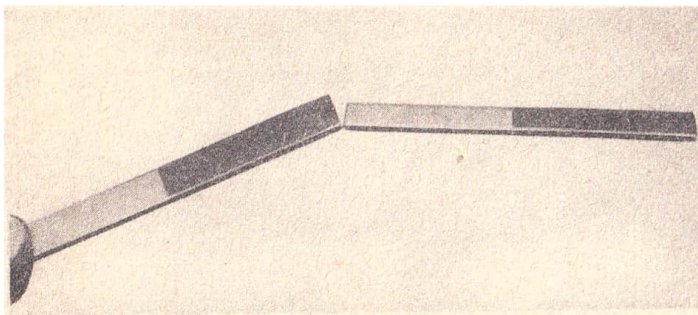


Bild 19: Ungleichnamige Pole ziehen einander an

Bricht man einen permanenten Stabmagneten in zwei Stücke, dann erhält man nicht einen einzelnen Nord- und einen einzelnen Südpol, sondern wieder zwei komplette Magneten, die jeweils wieder einen Nord- und einen Südpol besitzen. Dieses Spiel kann immer weiter fortgesetzt werden, man erhält immer einen selbständigen kompletten Magneten (Bild 20).

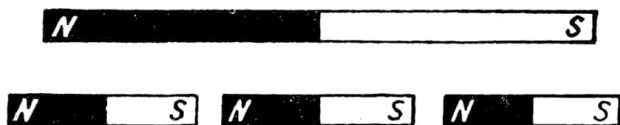


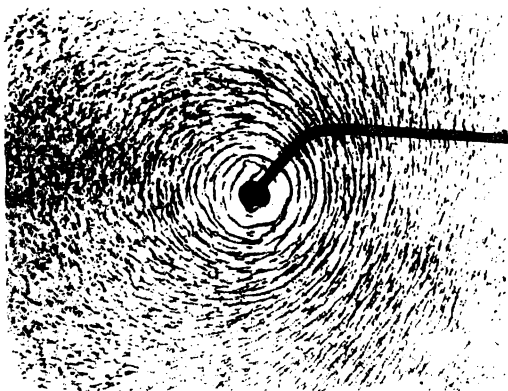
Bild 20: Teilen eines permanenten Magneten

Beim Teilen von permanenten Magneten erhält man immer komplette einzelne Magneten.

1.7.2. Grunderscheinungen des magnetischen Feldes

1.7.2.1. Magnetisches Feld eines geraden Leiters

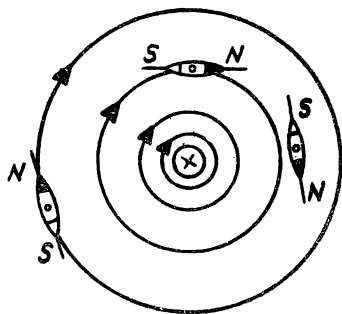
Führt man durch eine waagerechte Pappscheibe einen Leiter lotrecht hindurch, durch den ein starker Strom von einigen Ampere fließt, und bestreut die Scheibe gleichmäßig mit einer dünnen Schicht Eisenspäne, dann ordnen sich diese nach leichtem Erschüttern zu konzentrischen Kreisen, wie im Bild 21 dargestellt.



Die konzentrischen Kreise des Bildes 21 um einen stromdurchflossenen Leiter bezeichnet man als das magnetische Feld, das

Bild 21: Magnetfeld eines linienhaften Leiters

untrennbar mit dem Leiter verbunden ist. Das magnetische Feld kann auch mit Magnetnadeln nachgewiesen werden. Ordnet man sie um einen senkrechten, stromdurchflossenen Leiter (Bild 22 innerer Kreis mit liegendem Kreuz) an, so schwingen sie so ein, daß aus der gerichteten Stellung aller Nordpole und aller Südpole ein bestimmter Drehsinn zu erkennen ist. Daraus ergibt sich, daß die Feldlinien einen Richtungssinn haben.



Den Richtungssinn der Feldlinien kann man nach der "Faustregel" bestimmen:

Bild 22: Nachweis eines magnetischen Feldes mit einer Magnetnadel

Umfaßt man den Stromleiter mit der rechten Hand so, daß der Daumen in Stromrichtung zeigt, dann geben die zur Faust gekrümmten Finger den Richtungssinn der magnetischen Feldlinien an (Bild 23).

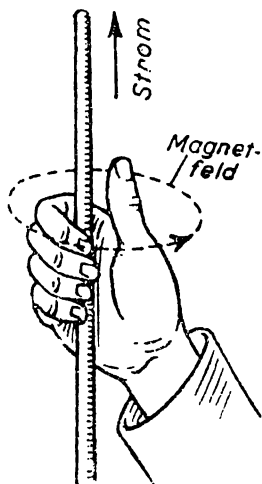


Bild 23: Faustregel

Beachten Sie aber beim Anwenden der Faustregel, daß Sie bei höheren Spannungen keinesfalls in der im Bild dargestellten Weise den stromführenden Leiter umfassen, sondern nur in genügender Entfernung vom Leiter die Regel anwenden!

An dieser Stelle sei noch ein Hinweis angebracht:

Man hat sich geeinigt, daß die Bezeichnung der Schnittfläche eines Leiters mit einem liegenden Kreuz einen vom Beschauer wegfließenden Strom und mit einem Punkt einen auf den Beschauer zufließenden Strom bedeutet.

1.7.2.2. Magnetisches Feld von Leiterschleifen und Spulen

Biegt man einen stromführenden Leiter zu einer Schleife, dann entsteht ein elektrisches Feld, wie es in Bild 24 dargestellt ist. Sie sehen, daß im Innern der Schleife alle Feldlinien die gleiche Richtung haben (homogenes Feld)! Fügt man mehrere Drahtschleifen zu einer Spule zusammen, dann überlagern sich die Felder der einzelnen Drahtschleifen zu einem Feldlinienbild, wie in Bild 25 gezeigt.

Wie Sie sehen, laufen die Feldlinien im Innern der Spule parallel. Parallellaufende Feldlinien bezeichnet man als homogenes Feld. Vergleicht man Bild 24 und Bild 25 miteinander, dann ist zu erkennen, daß sich bei der Spule die magnetischen Wirkungen gegenüber der einzelnen Leiterschleife wesentlich verstärken.

Auf Grund der Anordnung der Feldlinien bei einer stromdurchflossenen Spule ist ein Vergleich mit dem magnetischen Feld eines Stabmagneten möglich. Bei einem Stabmagneten (Bild 26)

quellen die Feldlinien aus dem Nordpol und münden wieder in den Südpol.

Das trifft auch für die stromdurchflossene Spule zu. Welches Ende einer stromdurchflossenen Spule ist nun der Nordpol und welches der Südpol? Biegen

Sie in Gedanken den in Bild 23 dargestellten geraden Leiter zu einem Ring (wie ihn Bild 24 zeigt) und verfolgen Sie den Verlauf der Feldlinien. Diese treten auf einer Seite des Ringes aus dem Inneren aus und auf der anderen Seite ein. Damit haben Sie den Nord- und den Südpol dieser Leiterschleife gefunden. Kehren Sie aber bei Ihrem Gedankenexperiment die

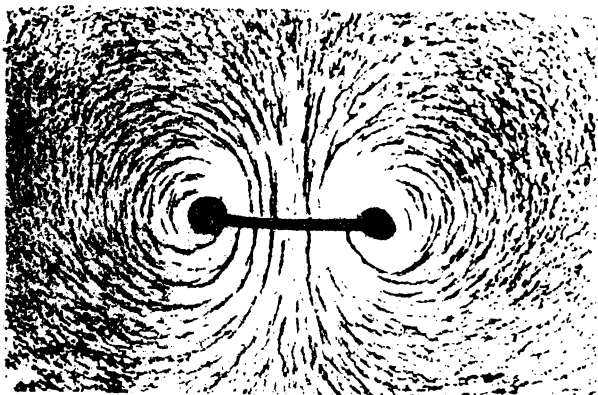


Bild 24: Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Leiterschleife

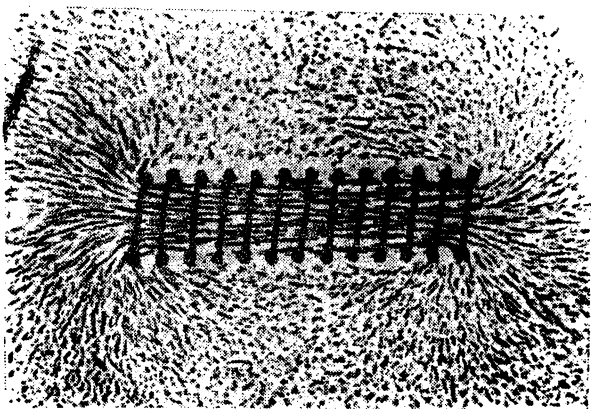
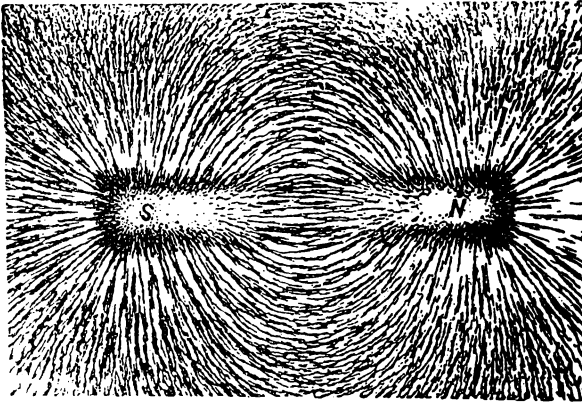


Bild 25: Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule



Stromrichtung in der Schleife um, so werden Sie feststellen, daß auch die Pole wechseln. Also ist die Polarität einer Schleife oder einer Spule von der Richtung des Stromes abhängig.

Bild 26: Feldlinienbild eines Stabmagneten

Zum Bestimmen der Polarität einer stromdurchflossenen Spule verwendet man vielfach die Uhrzeigerregel:

Sie blicken dann auf den Südpol einer Spule, wenn der Strom die Spule im Uhrzeigersinn, und dann auf den Nordpol, wenn der Strom die Spule entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn umfließt (Bild 27: Spulenfläche senkrecht zur Längsachse).

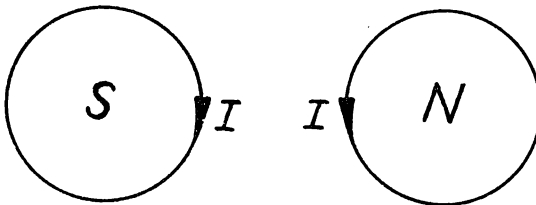


Bild 27: Uhrzeigerregel

1.7.3. Magnetische Größen

Wie bereits im Abschnitt 1.7.1. dargestellt, gibt es zwischen den elektrischen Erscheinungen in Leitern bzw. Nichtleitern und den elektromagnetischen Erscheinungen sehr enge Verbindungen. Sie sollen einige magnetische Größen durch Vergleiche des magnetischen mit dem elektrischen Grundstromkreis kennenlernen.

Sie wissen, daß der elektrische Grundstromkreis aus einer Spannungsquelle (Urspannung und innerer Widerstand) besteht, die mit einem Belastungswiderstand zusammengeschaltet ist (Bild 28a).

Der magnetische Kreis stellt einen Idealfall dar, der annähernd durch einen Weicheisenring (ein magnetisch sehr guter Leiter) nachgebildet werden kann. Um den Weicheisenring soll eine Spule gewickelt sein, die von einem Strom durchflossen wird (Bild 28b).

Analogien

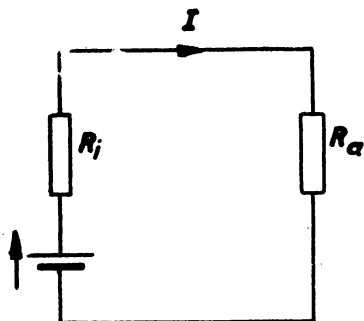


Bild 28a: Elektrischer Grundstromkreis

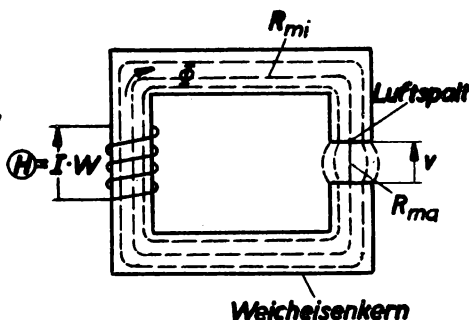


Bild 28b: Magnetischer Kreis

Größen im elektrischen Kreis:

Stromstärke I
Stromdichte S
Urspannung E
Spannungsabfall U
Widerstand R
Leitfähigkeit κ

Größen im magnetischen Kreis:

Stärke des Magnetflusses Φ
magnetische Induktion \mathcal{B}
magnetische Urspannung \mathcal{E}
magnetischer Spannungsabfall V
magnetischer Widerstand R_m
Permeabilität
(magn. Leitfähigkeit) μ

1.7.3.1. Der Magnetfluß Φ

Denken Sie noch einmal an die im Abschnitt 1.7.2.2. beschriebene stromdurchflossene Spule (Bild 25)! Im Innern dieser Spule laufen alle Feldlinien des magnetischen Feldes parallel (homogenes Feld). Wie Ihnen weiter bekannt ist, hat jede vom Strom durchflossene Spule einen Nord- und einen Südpol. Die im Innern der Spule parallellaufenden Feldlinien treten aus dem Nordpol aus, um dann am Südpol wieder einzumünden. Dieses "Streufeld" außerhalb der Spule kann man zum großen Teil unter-

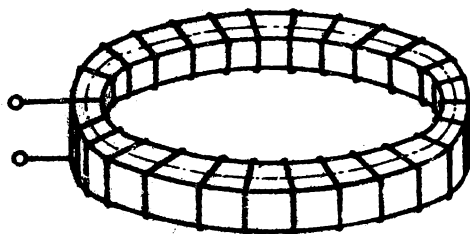


Bild 29: Ringspule

binden, wenn sich die Spule auf einem endlosen, guten, magnetischen Leiter (Weicheisenring) befindet (Bild 29).

Die Feldlinien bilden in diesem Weicheisenring der Ringspule ein geschlossenes Band von

gleicher Dichte (Bild 30). Dieses Feldlinienband läßt sich mit dem Stromfluß in einem elektrischen Stromkreis vergleichen, und man bezeichnet es im Gegensatz zum Stromfluß mit Magnetfluß Φ (griechischer Buchstabe Phi).

Beim Vergleich zwischen dem elektrischen Strom und dem Magnetfluß muß man beachten, daß diese beiden Erscheinungen sich nicht in jeder Beziehung gleichen. So ist z.B. beim Magnetfluß in Wirklichkeit kein eigentliches Strömen zu verzeichnen.

Lediglich die Ähnlichkeit in den Hauptmerkmalen (in sich geschlossenes Band von in jedem Querschnitt gleicher Stärke, Verhalten gegenüber dem Widerstand) gestattet diesen Vergleich.

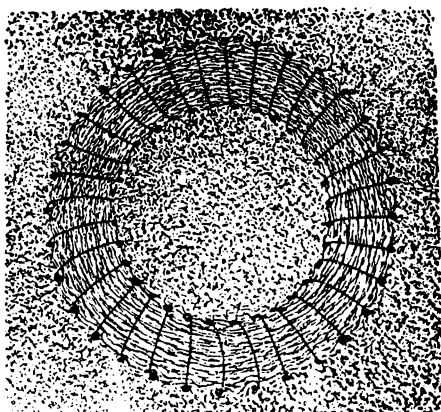


Bild 30: Feld einer stromdurchflossenen Ringspule

Die Einheit des Magnetflusses Φ ist

$1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Sekunde} = 1 \text{ Voltsekunde} = 1 \text{ Vs}$ $1 \text{ Vs} = 10^8 \text{ Maxwell} = 10^8 \text{ M} \quad 1)$

Die gesetzliche Einheit für den magnetischen Fluß Φ ist das Weber Wb oder die Voltsekunde Vs.

$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$

Das Weber oder die Voltsekunde ist der magnetische Fluß, der in einer ihn umschlingenden Windung die elektrische Spannung 1 V induziert, wenn er während der Zeit 1 s gleichmäßig auf Null abnimmt.

Kommen Sie später nochmals auf diese Festlegung zurück.

1.7.3.2. Magnetflußdichte (magnetische Induktion) \mathcal{B}

Bei der Behandlung des elektrischen Kreises lernten Sie die Stromdichte S - die Stromstärke I bezogen auf eine bestimmte

1) Maxwell und Gauß sind keine gesetzlich zulässigen Maßeinheiten mehr. Sie seien hier jedoch erwähnt, weil man sie in der Literatur noch vorfindet.

Querschnittsfläche eines Leiters - kennen.

$$S = \frac{I}{A}$$

Analog dazu hat man auch die Magnetflußdichte \mathcal{L} festgelegt. Sie wird vielfach auch als magnetische Induktion bezeichnet. Die Magnetflußdichte oder magnetische Induktion \mathcal{L} ist das Verhältnis aus der Magnetflußstärke Φ und der Querschnittsfläche A des magnetischen Kreises.

$$\text{Magnetische Induktion} = \frac{\text{Magnetfluß}}{\text{Querschnittsfläche}}$$

$$\boxed{\mathcal{L} = \frac{\Phi}{A}} \quad (10)$$

Die Einheit der magnetischen Induktion erhält man durch Einsetzen der einzelnen Einheiten in die Gleichung (10)

$$\left[\mathcal{L} \right] = \left[\frac{\Phi}{A} \right] = \frac{1 \text{ Vs}}{\text{cm}^2}$$

In der Technik verwendet man vielfach noch statt $1 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ als Einheit der magnetischen Induktion die veraltete Einheit

$$1 \frac{\text{M}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ Gauß} = 1 \text{ G}$$

Gebräuchliche Einheiten für die magnetische Induktion \mathcal{L} :

$$\boxed{\begin{array}{ll} 1 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} & \text{und} \\ 1 \frac{\text{M}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ G} & 1) \\ 10^8 \text{ G} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} & 1) \end{array}}$$

1) Siehe Fußnote auf Seite 39

1.7.3.3. Die magnetischen Spannungsgrößen

a) Magnetische Urspannung Θ

Die gleiche Funktion, die bei dem elektrischen Grundstromkreis die Spannungsquelle einnimmt, obliegt beim magnetischen Kreis der stromdurchflossenen Spule (Bild 28b). Auch unterscheidet man beim magnetischen Kreis zwischen der magnetischen Urspannung und dem magnetischen Spannungsabfall.

Der Sitz der magnetischen Urspannung im magnetischen Kreis ist die stromdurchflossene Spule.

Die magnetische Urspannung hat eine ähnliche Aufgabe wie die elektrische, sie treibt den magnetischen Strom, den Magnetfluß Φ an.

In der stromdurchflossenen Spule des magnetischen Kreises findet eine Umwandlung von elektrischer in magnetische Energie statt. Die Größe der magnetischen Urspannung ist abhängig von der Stromstärke I , die in der Spule auftritt, und von der Anzahl der Windungen w der Spule auf dem magnetischen Kreis.

Die magnetische Urspannung Θ (griechischer Buchstabe Theta), die man auch vielfach als Durchflutung bezeichnet, ist gleich dem Produkt aus Stromstärke I und Anzahl der Windungen w der Spule:

$$\Theta = I \cdot w$$

(11)

Die Einheit der magnetischen Urspannung erhält man durch Einsetzen der einzelnen Einheiten in die Gleichung (11). Die Windungszahl ist eine dimensionslose Größe und hat daher keine Einheit.

$$[\Theta] = [I] \cdot w = A$$

$$\text{Einheit der magnetischen Urspannung} = \text{Ampere} (= A)$$

Vielfach wird jedoch in der Praxis als Einheit der magnetischen Urspannung die Amperewindung (AW) benutzt, man setzt die Größe w (= Anzahl der Windungen) mit der Einheit W (= Windungen) ein.

Die Einheit der magnetischen Ursprung von 1 A ist dann gegeben, wenn die Spule auf dem magnetischen Kreis von 1 Ampere durchflossen wird und nur eine Windung hat.

Lehrbeispiel 7

Welche Durchflutung Θ (magnetische Ursprung) liefert eine Spule im magnetischen Kreis

- a) mit 20 Windungen, bei einer Stromstärke I von 5 A und
- b) mit 200 Windungen, bei einer Stromstärke I von 0,5 A?

Lösung :

Gegeben: a) I = 5 A

Gesucht: Θ = ?

w = 20

b) I = 0,5 A

w = 200

$$\Theta = I \cdot w \quad (11)$$

a) $\Theta = 5 \text{ A} \cdot 20 = 100 \text{ A}$

b) $\Theta = 0,5 \text{ A} \cdot 200 = 100 \text{ A}$

Sie erkennen aus diesem Lehrbeispiel:

Es kann die gleiche magnetische Ursprung mit großer Stromstärke und kleiner Windungszahl bzw. kleiner Stromstärke und großer Windungszahl erreicht werden.

b) Magnetischer Spannungsabfall V

Der magnetische Spannungsabfall V im magnetischen Kreis ist mit dem Spannungsabfall im elektrischen Kreis vergleichbar. Während die Ursprung im elektrischen Kreis den Strom I antreibt, veranlaßt im magnetischen Kreis die Durchflutung Θ (= magnetische Ursprung), daß sich der Magnetfluß Φ ausbildet. Analog zum elektrischen Grundstromkreis wird auch der Magnetfluß im magnetischen Kreis gehemmt, und zu seiner Aufrechterhaltung wird magnetische Spannung verbraucht. Es tritt der magnetische Spannungsabfall auf. Er wird mit dem Buchstaben V bezeichnet.

Vergleichen wir weiter den magnetischen Kreis mit dem elektrischen Stromkreis. Auch beim magnetischen gilt in abgewandelter Form das 2. Kirchhoffsche Gesetz:

In einem Stromkreis mit einer Spannungsquelle ist die Summe aller Spannungsabfälle gleich der Urspannung.

Zweites Kirchhoffsche Gesetz, angewandt auf den Grundstromkreis:

$$E = \sum U$$

Analog dazu der magnetische Kreis:

In einem magnetischen Kreis ist die Durchflutung (= magnetische Urspannung) gleich der Summe der magnetischen Spannungsabfälle über den einzelnen Teilstücken des Kreises.

$$\Theta = \sum V \quad (12)$$

Die Einheit des magnetischen Spannungsabfalls V ist die gleiche wie die der Durchflutung Θ :

$$\text{Einheit des magnetischen Spannungsabfalls } V = 1 \text{ A } (= 1 \text{ AW})$$

1.7.3.4. Der magnetische Widerstand R_m

Auch den magnetischen Widerstand R_m wollen wir aus dem Vergleich mit dem elektrischen Grundstromkreis ableiten.

Unter dem magnetischen Widerstand verstehen wir die Eigenschaft eines jeden Körpers, sich dem Magnetfluß Φ zu widersetzen.

Für die Berechnung des elektrischen Widerstandes hatten wir abgeleitet:

$$\text{elektrischer Widerstand } R = \frac{\text{Spannungsabfall } U \text{ ü.d. Widerstand}}{\text{Stromstärke } I \text{ im Widerstand}}$$

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

Analog dazu gilt für den Widerstand im magnetischen Kreis:

$$\text{Magnetischer Widerstand } R_m = \frac{\text{magnetischer Spannungsabfall } V}{\text{Magnetfluß } \Phi}$$

$$R_m = \frac{V}{\Phi}$$

(13)

Die Einheit des magnetischen Widerstands ermittelt man, indem man in die Gleichung (13) die Einheiten der einzelnen Größen einsetzt:

Einheit des magnetischen Widerstands

$$[R_m] = \frac{[V]}{[\Phi]} = \frac{A}{Vs}$$

Wie Sie in einem späteren Abschnitt noch lernen werden, hat für den Magnetismus noch eine andere Einheit Bedeutung: das Henry.

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

Nach dieser Beziehung kann man daher auch als Einheit des magnetischen Widerstands einsetzen:

$$\text{Einheit des magnetischen Widerstands} = 1 \frac{A}{Vs} = \frac{1}{H}$$

Die Bemessungsgleichung des magnetischen Widerstands

Im Ibf. 1 lernten Sie die Bemessungsgleichung für den elektrischen Widerstand in folgenden zwei Formen kennen:

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

und

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

Die Gleichung in der zweiten Form wollen wir uns genauer betrachten; denn von ihr können wir durch die Analogie die Bemessungsgleichung des magnetischen Widerstands übernehmen:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (14)$$

Der magnetische Widerstand R_m im magnetischen Kreis ist ebenfalls wie der elektrische Widerstand proportional der Länge l und umgekehrt proportional dem Querschnitt A des Leiters. Der Faktor μ ist eine magnetische Materialkenngröße, die man mit Permeabilität bezeichnet (lateinisch: permeare = hindurchgehen).

Die Permeabilität μ charakterisiert die magnetische Leitfähigkeit des betreffenden Stoffes und entspricht in der Bemessungsgleichung des elektrischen Widerstands dem Faktor κ (elektrische Leitfähigkeit). Wie bei der Dielektrizitätskonstante ϵ (im elektrischen Feld) unterscheidet man bei der Permeabilität μ zwischen der Permeabilität des Vakuums μ_0 und der relativen Permeabilität μ_{rel} .

Permeabilität μ = Permeabilität des Vakuums μ_0 · relative Permeabilität μ_{rel}

$$\boxed{\mu = \mu_0 \cdot \mu_{rel}} \quad (15)$$

Die Permeabilität des Vakuums μ_0 wird vielfach auch als Induktionskonstante bezeichnet und hat folgenden Wert:

$$\boxed{\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \approx 0,4\pi \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}}}$$

Die relative Permeabilität μ_{rel} eines beliebigen Stoffes stellt ein Vielfaches der Permeabilität des Vakuums μ_0 dar und ist daher eine dimensionslose Größe.

Luft hat die relative Permeabilität $\mu_{rel} = 1,000\,0004$ und unterscheidet sich so wenig von der des Vakuums, daß es praktisch immer ausreicht, Luft als Bezugstoff zu wählen.

Man teilt die Stoffe nach ihrer Permeabilität in drei Gruppen ein:

1. die diamagnetischen Stoffe mit einer relativen Permeabilität $\mu_{rel} < 1$ (Diamagnetische Stoffe setzen dem Magnetfluß einen großen Widerstand entgegen.)
2. die paramagnetischen Stoffe mit einer relativen Permeabilität $\mu_{rel} > 1$ (Paramagnetische Stoffe setzen dem Magnetfluß einen geringeren Widerstand entgegen als das Vakuum bzw. die Luft.)
3. die ferromagnetischen Stoffe mit einer relativen Permeabilität $\mu_{rel} \gg 1$ (10 ... 170 000). (Diese Stoffe werden ge-

nauer in dem Abschnitt "Das magnetische Feld in Eisen" behandelt.)

Die relative Permeabilität von einigen Stoffen zeigt Ihnen die Tafel 2.

T a f e l 2

Diamagnetische Stoffe	Paramagnetische Stoffe	Ferromagnetische Stoffe
Wismut = 0,999 830	Luft = 1,000 0004	versch. Eisen-
Kupfer = 0,999 990	Alumi-	legie-
Silber = 0,999 921	nium = 1,000 022	rungen = 100...50 000
Wasser = 0,999 990	Platin = 1,000 360	Kobalt = 70...200
		Nickel = 10...300

L e h r b e i s p i e l 8

Berechnen Sie für eine Ringspule (Bild 29), die einen Querschnitt $A = 0,850 \text{ cm}^2$ und einen Umfang (= Länge l) = 25 cm bei einer Permeabilität von $\mu_{\text{rel}} = 800$ hat, den magnetischen Widerstand R_m !

Welcher Magnetfluß herrscht in dem magnetischen Kreis, wenn durch die Spule mit $w = 250$ W ein Strom von 1,5 A fließt?

L ö s u n g :

Gegeben: $A = 0,850 \text{ cm}^2$

Gesucht: $R_m = ?$

$l = 25 \text{ cm}$

$\Phi = ?$

$\mu_{\text{rel}} = 800$

$w = 250$

$I = 1,5 \text{ A}$

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_{\text{rel}} \cdot A}$$

$$R_m = \frac{25 \text{ cm}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot 800 \cdot 0,850 \text{ cm}^2}$$

$$= 2,93 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{H}}$$

=====

Den Magnetfluß kann man aus dem Ohmschen Gesetz des magnetischen Kreises berechnen:

$$R_m = \frac{V}{\Phi} \quad (13)$$

Unter der Voraussetzung, daß es sich um einen geschlossenen magnetischen Kreis handelt, gilt

$$\mathcal{O} = V = I \cdot w ;$$

kann man statt V in die Gleichung (13) $I \cdot w$ einsetzen:

$$\begin{aligned} R_m &= \frac{I \cdot w}{\Phi} \\ \Phi &= \frac{I \cdot w}{R_m} = \frac{1,5 \text{ A} \cdot 250}{2,93 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{H}}} \\ &= 128 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{H} \\ &= 128 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A} \cdot \text{Vs}}{\text{A}} \\ \Phi &= 12\,800 \cdot 10^{-8} \text{ Vs} \\ &===== \end{aligned}$$

1.7.3.5. Die magnetische Feldstärke §

Bisher hatten wir uns nur mit dem magnetischen Kreis (z.B. mit den magnetischen Vorgängen in dem Weicheisenring einer Ringspule, Bild 30) beschäftigt.

Wie Sie beim Betrachten der Feldlinienbilder bestimmt schon selbst bemerkt haben, bestehen äußerlich gewisse Ähnlichkeiten zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld. Es soll daher auch die Grundgröße des magnetischen Feldes durch Analogien zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld abgeleitet werden.

Analogien

Elektrisches Feld:

elektrische Feldstärke \mathcal{E}

Magnetisches Feld:

magnetische Feldstärke \mathcal{H}

Magnetische Feldstärke
=====

Für die elektrische Feldstärke hatten wir im Abschnitt

1.6.2.1. folgende Gleichung festgelegt:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a}$$

Die Feldstärke eines elektrischen Feldes ist gleich dem Quotienten aus der an den Elektroden anliegenden Spannung und dem Abstand der Elektroden. (Diese Form der Gleichung war nur gültig bei einem homogenen Feld = parallellaufende Feldlinien.) Wenden wir diese Feststellung als Analogie auch für das magnetische Feld an! Den Spannungsabfall im magnetischen Kreis haben wir mit V bezeichnet.

Man berechnet die magnetische Feldstärke eines homogenen Feldes, indem man den zwischen zwei Punkten herrschenden Spannungsabfall durch die Länge der Feldlinien l dividiert.

Danach gilt für die magnetische Feldstärke \mathcal{H} :

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l} \quad (16)$$

Die Einheit der magnetischen Feldstärke erhält man durch Einsetzen der Einheiten der einzelnen Größen in die Gleichung (16).

$$[\mathcal{H}] = \left[\frac{V}{l} \right] = \frac{A}{cm}$$

$$\text{Einheit der magnetischen Feldstärke: } \frac{\text{Ampere}}{cm} = \frac{A}{cm}$$

Betrachten Sie dazu das Bild 31!

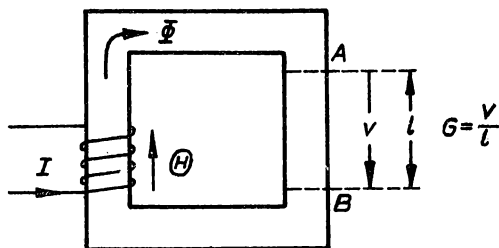


Bild 31: Magnetischer Kreis

Die magnetische Urspannung (= Durchflutung) Θ wird durch eine von der Stromstärke I durchflossenen Spule erzeugt. Die magnetische Urspannung Θ treibt den Magnetfluß Φ an. Durch den magnetischen Widerstand R_m wird ein

magnetischer Spannungsabfall V zwischen den Punkten A und B des magnetischen Kreises hervorgerufen. Zwischen den Punkten A und B des magnetischen Kreises besteht die Entfernung l .

Man kann die magnetische Feldstärke \mathcal{H} zwischen den Punkten A und B des magnetischen Kreises berechnen, indem man den Quotienten aus magnetischem Spannungsabfall V und der Entfernung l bildet.

Lehrbeispiel 9

Berechnen Sie die Feldstärke eines magnetischen Kreises, der durch eine Stromspule von 100 Windungen und eine Stromstärke $I = 1 \text{ A}$ erregt wird und dessen Umfang (= Länge l) = 15 cm beträgt!

Lösung :

Gegeben: $w = 100$

$I = 1 \text{ A}$

$l = 15 \text{ cm}$

Gesucht: $\mathcal{H} = ?$

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l}$$

$$V = I \cdot w$$

$$\mathcal{H} = \frac{I \cdot w}{l}$$

$$= \frac{1 \text{ A} \cdot 100}{15 \text{ cm}} = 6,67 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

=====

Wir wollen noch die Beziehung zwischen der magnetischen Induktion \mathcal{B} (= Magnetflußdichte) und der magnetischen Feldstärke \mathcal{H} untersuchen.

Nach Gleichung (10) gilt für die magnetische Induktion:

$$\mathcal{B} = \frac{\Phi}{A}$$

und für die magnetische Feldstärke \mathcal{H} (16):

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l}$$

Für den magnetischen Widerstand R_m hatten wir folgende Gleichung ermittelt:

$$R_m = \frac{V}{\Phi} \quad (13)$$

und

$$R_m = \frac{1}{\mu \cdot A} \quad (14)$$

Es ist also

$$\frac{V}{\Phi} = \frac{1}{\mu \cdot A}$$

Durch Umstellung dieses Ausdruckes erhält man die Beziehung zwischen der magnetischen Induktion \mathcal{B} und der Feldstärke \mathcal{H} :

$$\mathcal{B} = \frac{\Phi}{A} = \mu \cdot \frac{V}{I}$$

Gemäß Gleichung (16) ist

$$\mathcal{H} = \frac{V}{I}$$

und damit

$$\begin{aligned} \mathcal{B} &= \mu \cdot \mathcal{H} \\ &= \mu_0 \mu_{\text{rel}} \cdot \mathcal{H} \end{aligned} \quad (17)$$

Die Magnetflußdichte bzw. magnetische Induktion \mathcal{B} an einer beliebigen Stelle des magnetischen Kreises ist gleich dem Produkt aus der an dieser Stelle herrschenden Feldstärke \mathcal{H} und der magnetischen Leitfähigkeit bzw. Permeabilität μ .

Zusammenfassung

=====

Die Feldlinien eines Magneten treten aus seinem Nordpol aus und enden am Südpol. Man kann den Richtungssinn der Feldlinien durch die Faustregel (rechte Hand) bestimmen:

Umfaßt man den Stromleiter mit der rechten Hand so, daß der Daumen in Stromrichtung zeigt, dann geben die zur Faust gekrümmten Finger den Richtungssinn der magnetischen Feldlinien an.

Die Polarität einer stromdurchflossenen Spule bestimmt man durch die Uhrzeigerregel:

Sie blicken dann auf den Südpol einer Spule, wenn der Strom die Spule im Uhrzeigersinn, und dann auf einen Nordpol, wenn der Strom die Spule entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn umfließt.

Zwischen dem elektrischen Grundstromkreis und dem magnetischen bestehen Analogien, mit deren Hilfe die Grundgesetze des magnetischen Kreises abgeleitet worden sind.

Der Magnetfluß Φ ist mit dem Stromfluß I im elektrischen Kreis zu vergleichen. Die Einheit des Magnetflusses ist die Voltsekunde (Vs) oder das Weber (Wb).

Der Stromdichte im elektrischen Grundstromkreis ist die Magnetflußdichte oder magnetische Induktion \mathcal{L} analog. Die Magnetflußdichte ist der Quotient aus Magnetfluß und Querschnittsfläche des magnetischen Leiters.

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{A}$$

Die Einheit der magnetischen Induktion ist $\frac{Vs}{cm^2}$ bzw. $\frac{Wb}{cm^2}$.

Genau wie bei der elektrischen Spannung unterscheidet man bei der magnetischen Spannung zwischen der magnetischen Urspannung (= Durchflutung) Θ und dem magnetischen Spannungsabfall V .

Die Einheit der magnetischen Spannung ist das Ampere (A), vielfach wird in der Praxis jedoch die Einheit Amperewindungen (AW) noch angewendet. Die Größe der magnetischen Urspannung errechnet man nach der Gleichung

$$\Theta = I \cdot w$$

Für den Spannungsabfall V im magnetischen Kreis gilt auch das 2. Kirchhoffsche Gesetz:

$$\Theta = \sum V$$

Der Spannungsabfall im magnetischen Kreis resultiert - wie im elektrischen Grundstromkreis - aus dem Widerstand. Für den

magnetischen Widerstand gilt in abgewandelter Form auch das Ohmsche Gesetz:

$$R_m = \frac{V}{\Phi}$$

Der magnetische Widerstand R_m ist ebenfalls wie der elektrische Widerstand proportional der Länge l und umgekehrt proportional dem Querschnitt A des Leiters, μ ist eine Materialkonstante, die man mit Permeabilität bezeichnet.

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

Die Permeabilität μ setzt sich aus der Permeabilität des Vakuums μ_0 und der relativen Permeabilität μ_{rel} zusammen:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_{rel}$$

Ebenfalls wie beim elektrischen Feld hat man auch beim magnetischen Feld die Größe der magnetischen Feldstärke \mathcal{H} eingeführt. Für die magnetische Feldstärke gilt

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l}$$

Die magnetische Feldstärke in einem homogenen Feld (parallel laufende Feldlinien) ist gleich dem Quotienten aus dem magnetischen Spannungsabfall V zwischen zwei Punkten und der Entfernung l der beiden Punkte.

Die Einheit der magnetischen Feldstärke ist $\frac{A}{cm}$.

Wiederholungsfragen

5. Nennen Sie alle Analogien zwischen dem elektrischen Grundstromkreis und dem magnetischen Kreis sowie dem elektrischen Feld und dem magnetischen Feld!
6. Welchem Feldbild ähnelt das Feld einer stromdurchflossenen Spule?
Begründen Sie die Antwort!
7. Worin besteht der Unterschied zwischen dem magnetischen Spannungsabfall V und der magnetischen Feldstärke \mathcal{H} ?

8. Worin besteht der Unterschied zwischen dia-, para- und ferromagnetischen Stoffen?

Ü b u n g e n

5. Ein Keramikring, dessen äußerer Durchmesser $d_1 = 70$ mm und innerer Durchmesser $d_2 = 60$ mm beträgt, ist mit 250 Windungen Kupferdraht bewickelt. Durch die Wicklung fließt ein Strom von 2 A (Bild 32).

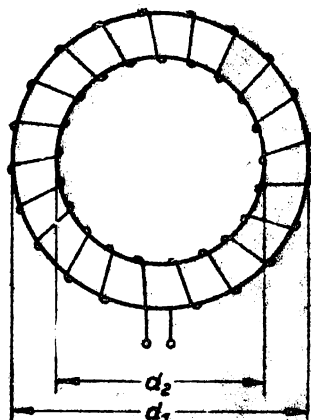


Bild 32

Berechnen Sie

- a) magn. Urspannung,
 - b) magn. Widerstand,
 - c) Magnetfluß,
 - d) magn. Induktion,
 - e) magn. Feldstärke.
6. Mit wieviel Windungen muß eine Ringspule bewickelt werden, wenn ein Strom von 0,5 A eine Induktion von $15 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ erzeugen soll? Mittlere Kraftlinienlänge = 35 cm.
7. Wieviel Windungen je cm besitzt eine lange Zylinderspule, die bei einem Durchmesser von 3 cm und einer Stromstärke von 2 A einen Fluß von $20 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}$ erzeugt?
8. Berechnen Sie den magnetischen Widerstand, der durch einen Luftspalt von 1 mm Breite in einem magnetischen Kreis von 5 cm^2 Querschnitt auftritt!

1.7.4. Das magnetische Feld in Eisen

1.7.4.1. Magnetisierungslinien und magnetische Hysteresis

Im vorhergehenden Abschnitt haben Sie die Zusammenhänge von magnetischer Induktion \mathcal{L} (Magnetflußdichte) und magnetischer Feldstärke \mathcal{H} kennengelernt:

$$\mathcal{L} = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot \mathcal{H}$$

In diesem Abschnitt sollen Sie sich mit dieser Gleichung näher beschäftigen. Wie Ihnen bekannt ist, unterscheidet man bei der relativen Permeabilität μ_{rel} zwischen

diamagnetischen Stoffen $\mu_{\text{rel}} < 1$,

paramagnetischen Stoffen $\mu_{\text{rel}} > 1$

und ferromagnetischen Stoffen $\mu_{\text{rel}} \gg 1$

Aus der Tafel 2 erkennen Sie, daß sich die relative Permeabili-

tät bei dia- und paramagnetischen Stoffen nur wenig von 1, also von der Permeabilität des Vakuums unterscheidet. Die relative Permeabilität μ_{rel} hat bei diesen Stoffen einen konstanten Wert, der nicht von der Feldstärke \mathcal{H} beeinflußt

wird. Betrachten Sie dazu das Bild 33, das Ihnen die Magnetisierungs-

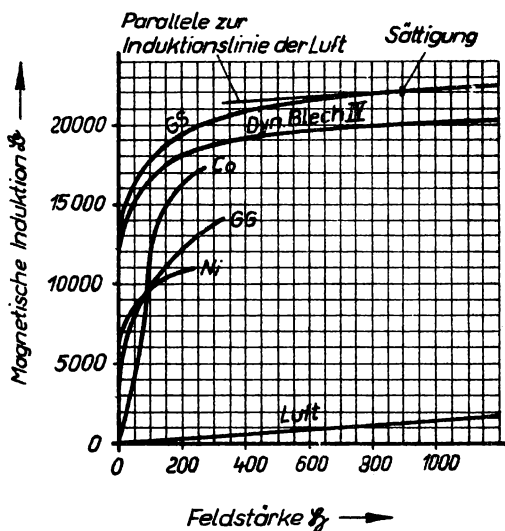


Bild 33: Magnetisierungslinien von Luft, Nickel, Grauguß, Kobalt, Dynamoblech und Stahlguß

Stoffen in Abhängigkeit von magnetischer Induktion \mathcal{L} und Feldstärke \mathcal{H} zeigt.

Beachten Sie vor allem die Magnetisierungskurve der Luft, die eine Gerade darstellt, deren relative Permeabilität μ_{rel} also unabhängig von der Feldstärke ist!

Die relative Permeabilität μ_{rel} von dia- und paramagnetischen Stoffen bleibt auch bei steigender Feldstärke konstant.

Ganz anders verhält sich die relative Permeabilität bei den ferromagnetischen Stoffen. Sie ist bei diesen Stoffen von der Feldstärke \mathcal{H} abhängig. Bereits bei niedriger Feldstärke ist die relative Permeabilität und damit die magnetische Induktion \mathcal{L} sehr groß, und die Steigung nimmt mit wachsender Feldstärke immer mehr ab, bis sie den Sättigungspunkt (bestimmte Magnetflußdichte \mathcal{L}) erreicht und dann dort konstant bleibt. Vom Sättigungspunkt an laufen alle Magnetisierungslinien als Parallelen der Magnetisierungslinie von Luft (Bild 33).

Wenn die Magnetisierungslinie das Gebiet der Sättigung erreicht hat, dann sind im ferromagnetischen Stoff alle Molekularmagnete ausgerichtet, so daß bei einer weiteren Steigerung die Induktion nach der Gleichung

$$\mathcal{L} = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot \mathcal{H}$$

im gleichen Maße zunimmt wie in Luft ($\mu_{\text{rel}} = 1,000\,0004$).

Magnetische Hysteresis

Die ferromagnetischen Stoffe haben jedoch gegenüber den dia- und paramagnetischen Stoffen noch eine andere Besonderheit. Die im Bild 33 gezeichnete Form der Magnetisierungslinien hat nur für die ferromagnetischen Stoffe Gültigkeit, die, vom unmagnetischen Zustand ausgehend, durch allmählich steigende Feldstärke magnetisiert werden. Betrachten Sie das Bild 34a! Die Kurve OA, die den Verlauf der magnetischen Induktion vom unmagnetischen Zustand bis zur Sättigung in Abhängigkeit von

der Feldstärke \mathcal{H} angibt, nennt man Neukurve. Sie entspricht den Magnetisierungslinien im Bild 33. Geht man mit der Feldstärke zurück, dann läuft die Kurve nicht wieder auf dem gleichen Wege zurück, sondern vom A nach B. Wenn die Feldstärke \mathcal{H} den Wert 0 erreicht, ist noch eine ganz beträchtliche Induktion OB zu verzeichnen. Diese Induktion nennt man Remanenz (zurückbleibender Magnetismus).

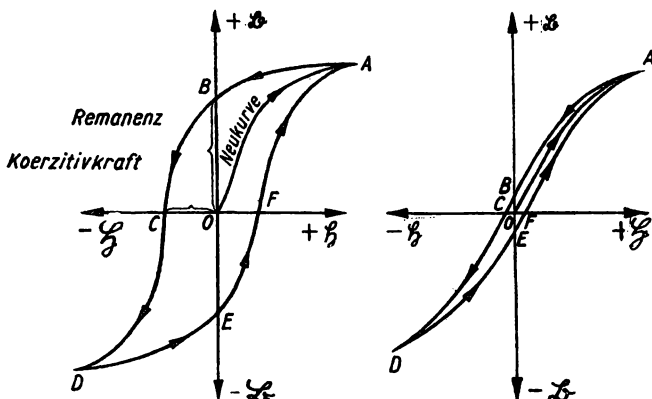


Bild 34: Hysteresisschleife

a) für magnetisch hartes Eisen

b) für magnetisch weiches Eisen

Will man die Remanenz in dem Eisen beseitigen, dann ist es notwendig, den Stromfluß in der magnetischen Ursprungsquelle, der Stromspule, umzukehren und damit der magnetischen Feldstärke die umgekehrte Richtung zu geben, sie also negativ zu machen. Die magnetische Induktion \mathcal{B} wird in dem Punkt C gleich 0. Die dazu notwendige negative Feldstärke \mathcal{H} mit dem Betrag OC bezeichnet man mit Koerzitivkraft. Fällt die Feldstärke weiter ab, dann nimmt die magnetische Induktion negative Werte an, d.h. sie kehrt sich um (Kurve CD). Steigt dann die Feldstärke wieder an, so steigt auch die magnetische Induktion \mathcal{B} entsprechend der Kurve DEFA. Sie prägen sich aus dieser Darstellung folgende Gesetzmäßigkeit ein:

Um die Remanenz (zurückbleibender Magnetismus) in Eisen zu überwinden, ist eine negative Feldstärke, die Koerzitivkraft, notwendig.

Aus Bild 34 ersehen Sie, daß die Fläche der Hysteresisschleife des magnetisch harten Eisens viel größer ist als die von magnetisch weichem Eisen. Die Fläche, die von der Hysteresisschleife eingeschlossen wird, entspricht dem Energiebetrag, der zum Ummagnetisieren des Eisens notwendig ist und der sich bei allen Wechselstrommaschinen in Form von Wärme sehr unliebsam bemerkbar macht. Um die Energieverluste und damit die Erwärmung möglichst klein zu halten, verwendet man daher in der Wechselstromtechnik bei Maschinen und Transformatoren nur magnetisch weiches Eisen.

Magnetisch hartes Eisen eignet sich wegen seiner großen Remanenz sehr gut als Dauermagnet. Dauermagneten finden z.B. Verwendung in permanentdynamischen Lautsprechern von Rundfunkgeräten oder als Dauermagnete für Versuchszwecke (Hufeisenmagnete, Stabmagnete).

1.7.4.2. Elektromagnete

Betrachten Sie das Bild 35 und stellen Sie sich folgenden Versuch vor! Der Strom durch die Spule S wird so geregelt, daß die Feder, die ein über der Spule befestigtes Weicheisenstück hält, nur wenig gedehnt wird (Bild 35a). Führt man in die Spule einen Weicheisenkern ein (Bild 35b), dann dehnt sich die Feder F wesentlich mehr aus als beim Versuch a). Die magnetische Anziehungskraft und damit die magnetische Feldstärke der Spule mit Eisenkern ist wesentlich größer als die der Spule ohne Weicheisenkern, obwohl bei beiden Versuchen die Stromstärke I die gleiche ist.

Aus diesem Versuch sehen Sie, daß man die Feldstärke einer stromdurchflossenen Spule mit einem Weicheisenkern verstärken kann. Denken Sie an die magnetischen Grundgrößen, die wir weiter vorn abgeleitet hatten! Für die magnetische Feldstärke gilt die Gleichung (16):

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l}$$

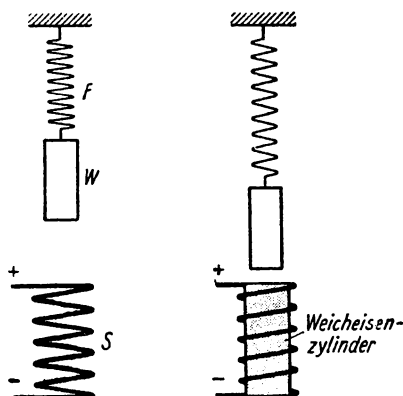


Bild 35: Verstärkung des Magnetfeldes einer Spule durch Weicheisenkern

- a) stromdurchflossene Spule ohne Weicheisenkern b) stromdurchflossene Spule mit Weicheisenkern

Aus dieser Gleichung ersehen wir: Erhöht sich die Feldstärke durch Einsetzen eines Weicheisenkerns in die Spule, so muß sich gleichzeitig auch der magnetische Spannungsabfall außerhalb der Spule erhöhen; denn die Länge l der Feldlinien bleibt konstant. Nach der Gleichung (12) gilt für den Spannungsabfall V :

$$\Theta = \sum V$$

Die Durchflutung Θ bleibt aber in dem magnetischen Kreis konstant, weil durch die Spule bei den Versuchen die gleiche Stromstärke I fließt und die Anzahl der Windungen in beiden Fällen die gleiche bleibt. Betrachten Sie aber die Gleichung (12) noch einmal! Wenn in die stromdurchflossene Spule ein Eisenkern eingeführt wird, dann verändert sich der magnetische Widerstand R_m des magnetischen Kreises, weil doch beim Versuch a als Leiter für den Magnetfluß Φ nur Luft in Betracht kommt (Luft ist im Verhältnis zum Eisen ein sehr schlechter Leiter; relative Permeabilität $\mu_{rel} = 1,000\,0004$ im Gegensatz zu Eisen $\mu_{rel} = 100 \dots 50\,000$). Wenn ein Teil des Leiters für den Magnetfluß Φ ein sehr guter magnetischer Leiter

ist (Eisenkern in Magnetspule), dann verringert sich in ihm im Gegensatz zum Versuch a der Spannungsabfall (im Innern der Spule). Da sich aber auch die magnetischen Spannungsabfälle wie die Widerstände verhalten, muß sich gemäß Gleichung (12) der magnetische Spannungsabfall außerhalb der Spule (in Luft) und damit die magnetische Feldstärke gemäß Gleichung (16) erhöhen.

Durch einen Weicheisenkern in einer stromdurchflossenen Spule verringert sich der magnetische Widerstand des magnetischen Kreises und erhöht sich die Feldstärke außerhalb der Spule. Eine stromdurchflossene Spule mit einem Weicheisenkern bezeichnet man als Elektromagnet.

1.7.4.3. Technische Anwendungen von Elektromagneten

a) Tragkraft eines Elektromagneten

Für die Tragkraft eines Elektromagneten können Sie sich folgende Faustformel merken:

$$F = \left(\frac{\mathcal{L}}{0,5 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot A \quad (18)$$

wobei die magnetische Induktion \mathcal{L} in $\frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ und die Fläche A in cm^2 einzusetzen ist; das Ergebnis, die Tragkraft F, erhält man dann in kp.

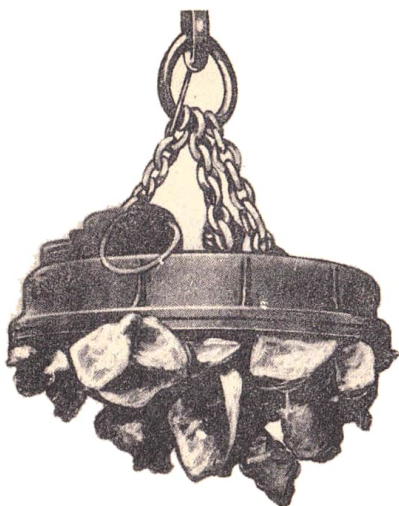
b) Anwendungen in der Starkstromtechnik

1. Lasthubmagnet

Der Lasthubmagnet wird vielfach in den Stahlwerken zum Transport von Schrott, Roheisen usw. verwendet. Er besteht hauptsächlich aus einem glockenförmigen Gußstahlkörper, in dessen Innerem eine Erregerwicklung sitzt (Bild 36).

2. Magnetische Kupplung

Bei der magnetischen Kupplung sind zwei ferromagnetische Radkränze so angeordnet, daß der eine Radkranz auf der angetriebenen Welle und der andere auf der anzutreibenden



Welle sitzt. In den einen Radkranz ist eine Erregerwicklung eingebettet, die durch Schleifringe gespeist wird.

Indem man durch die Erregerwicklung einen mehr oder weniger starken Strom schickt, kann man die Kupplungsstärke je nach Bedarf regeln (Bild 37).

Bild 36: Lasthubmagnet

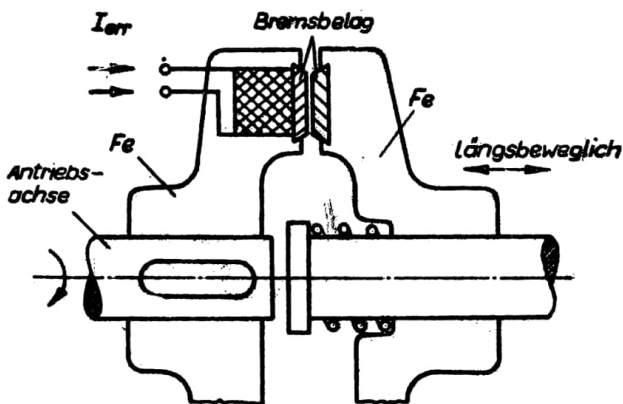


Bild 37: Elektromagnetische Kupplung

3. Spannplatten

Spannplatten dienen vor allem beim Hobeln, Fräsen oder Schleifen zum Aufspannen von komplizierten ferromagnetischen Werkstücken, deren Oberfläche nicht beschädigt werden soll.

Spannplatten stellt man in runder oder rechteckiger Form her. Sie sind in Segmente von gegensätzlicher Polarität unterteilt, die bewirken, daß das ferromagnetische Werkstück festgehalten wird (Bild 38).

Bei Spannplatten werden neuerdings auch Permanent-Magnete (Dauermagnete) benutzt.

Nichtferromagnetikum

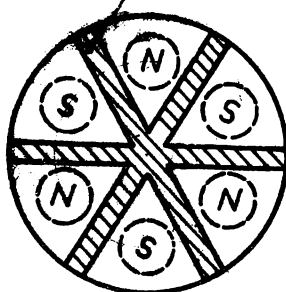


Bild 38: Spannmagnet

4. Schaltschütze

In der Starkstromtechnik verwendet man u.a. Schaltschütze, um einen leistungsstarken Stromkreis auch von einem entfernt liegenden Punkt schalten zu können. Denken Sie dabei z.B. an die Pumpen der Wasserwerke, die meist alle in ziemlicher Entfernung von der eigentlichen Zentrale der Wasserwerkes liegen, aber von dort geschaltet werden müssen.

Betrachten Sie dazu das Bild 39! Um den leistungsstarken Kreis, der meist als der gesteuerte Kreis bezeichnet wird, schalten zu können, bedient man sich eines gesonderten Stromkreises, des steuernden Stromkreises, der viel leistungsschwächer ausgelegt ist, weil er nur einen Elektromagneten zu speisen braucht. Im Bild 39a ist die Schaltung für den Schütz angegeben, und Bild 39b zeigt Ihnen ein Ausführungsbeispiel. Der gesteuerte Kreis wird dabei durch einen Quecksilberschalter geschaltet, der den Vorteil der geringsten Kontaktabnutzung bei den Schaltvorgängen hat.

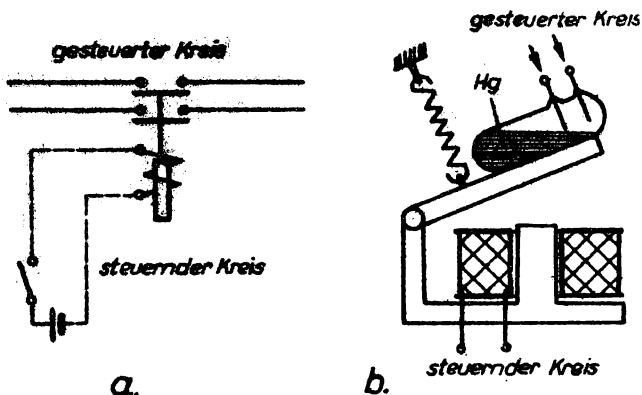


Bild 39

a) Schaltung

b) Schaltschütz mit
Quecksilberschalter

5. Überstromauslöser

Im Lehrbrief 2 lernten Sie den Überstromauslöser und den Sicherungsautomaten kennen. Wir behandelten dort nur den thermischen Überstromauslöser, der auf einen länger dauernden, auch geringen Überstrom anspricht. Für Kurzschlußströme ist aber der thermische Überstromauslöser zu träge, deshalb baut man zusätzlich in die Ihnen bekannten Sicherungsautomaten magnetische Überstromauslöser ein. Der Verbraucherstrom fließt dabei über eine Erregerspule, die so ausgelegt ist, daß sie von einer bestimmten Stromstärke an eine Schaltklinke anzieht. Dabei wird die Verriegelung für ein Kniehebelschaltwerk freigegeben, das dann den Stromkreis unterbricht.

c) Anwendungen in der Schwachstromtechnik

1. Relais

Dem Relais obliegt in der Schwachstromtechnik die gleiche Aufgabe wie dem Schütz in der Starkstromtechnik, nur mit dem Unterschied, daß meist nicht nur ein gesteuerter Kreis von einem Relais geschaltet werden kann,

sondern meist m e h -
r e r e durch Auf-
setzen von mehreren
Kontaktfedersätzen auf
ein Relais (Bild 40).

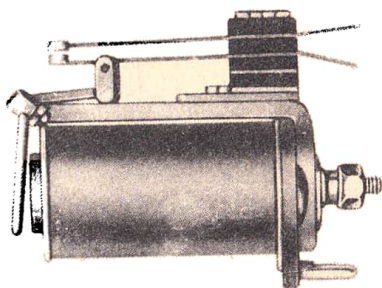


Bild 40: Relais

2. Die elektrische Klingel

Betrachten Sie dazu das Bild 41! Die beiden Spulen S der elektrischen Klingel haben entgegengesetzten Wicklungssinn. Drückt man den Klingelknopf, so fließt ein Strom durch die Spulen S, den Anker A, über die Feder zur Kontaktspitze K und von da aus zurück zur Spannungsquelle. Infolge des Stromflusses in der Spule S wird der Anker A mit der Feder angezogen, wodurch der Stromfluß zwischen Feder und Kontaktspitze K unterbrochen ist. Das elektromagnetische Feld der Spule S bricht zusammen, der Anker A fällt wieder ab und es gibt Kontakt zwischen der Feder und der Kontaktspitze K. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, wie der Klingelknopf betätigt wird, wobei der Hammer auf die Glocke schlägt.

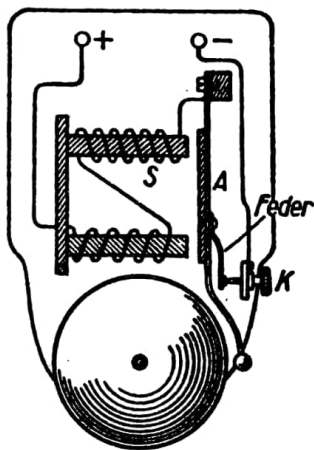


Bild 41: Elektrische Klingel

Zusammenfassung =====

Die relative Permeabilität μ_{rel} aller ferromagnetischen

Stoffe ist von der Feldstärke \mathcal{H} abhängig. Deshalb sind die Magnetisierungslinien der ferromagnetischen Stoffe keine Geraden, wie die der Luft, sondern die relative Permeabilität ist bereits bei geringer Feldstärke bei diesen Stoffen sehr groß. Die Induktion \mathcal{B} steigt daher nach der Gleichung

$$\mathcal{B} = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot \mathcal{H}$$

mit wachsender Feldstärke sehr stark an, bis die Sättigung (bestimmte Magnetflußdichte) des ferromagnetischen Stoffes erreicht ist. Von da aus laufen alle Magnetisierungslinien als Parallelen zur Magnetisierungslinie von Luft.

Jeder ferromagnetische Stoff behält nach dem Magnetisieren den sogenannten remanenten Magnetismus (Restmagnetismus). Um ihn zu beseitigen, muß man die Koerzitivkraft aufwenden. Aus der Magnetisierungskurve, dem remanenten Magnetismus und der Koerzitivkraft erhält man die Hysteresisschleife, deren Flächeninhalt Auskunft über die Größe der Ummagnetisierungsverluste (Wärmeverluste) gibt.

Durch Einführen eines Weicheisenkerns in eine stromdurchflossene Spule kann der magnetische Widerstand eines Teils des magnetischen Kreises verringert und damit die Feldstärke des übrigen Kreises erhöht werden. Stromdurchflossene Spulen mit einem Weicheisenkern bezeichnet man als Elektromagnete. Diese wendet man unter anderem als Lasthubmagnete, magnetische Kupplungen, magnetische Spannplatten, Schaltschütze, Überstromauslöser, elektrische Klingeln usw. an.

Wiederholungsfragen =====

9. Was verstehen Sie unter Remanenz? Was ist Koerzitivkraft, welche Einheit hat sie?
10. Wie verhält sich die relative Permeabilität μ_{rel} von ferromagnetischen Stoffen bei steigender Induktion \mathcal{B} ?
11. Warum ist die magnetische Feldstärke \mathcal{H} bei stromdurchflossenen Spulen mit einem Weicheisenkern größer als bei Spulen ohne Weicheisenkern?

12. Warum schaltet man bei einer elektrischen Klingel die Spulen des Elektromagneten so, daß sie gegenläufig vom Strom durchflossen werden?

Antworten auf die Wiederholungsfragen

=====

1. Die Verschiebungsdichte ϱ gibt die Ladungsmenge an, die bei einem Kondensator auf der Fläche von 1 cm^2 zwischen den Elektroden verschoben wird. Im Gegensatz dazu ermittelt man mit der Verschiebungsladung Q die Ladungsmenge, die über die g e s a m t e Fläche zwischen den Elektroden eines Kondensators verschoben wird. Zwischen der Verschiebungsdichte ϱ und der Verschiebungsladung Q besteht die Beziehung:

$$Q = \varrho \cdot A$$

Um die Verschiebungsladung Q eines Plattenkondensators zu berechnen, muß man die Verschiebungsdichte ϱ mit der Fläche A der Elektroden multiplizieren.

2. Um bei einem Plattenkondensator die Kapazität zu ändern, bestehen zwei Möglichkeiten:
- a) Verändern der wirksamen Plattenoberfläche A und
 - b) Verändern des Plattenabstandes.

Wie Sie aus der Gleichung (5)

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a}$$

ablesen können, vergrößert sich die Kapazität C , wenn man den Plattenabstand a verkleinert oder die Fläche A vergrößert, und verkleinert sich die Kapazität C beim Vergrößern des Plattenabstandes a oder Verkleinern der Plattenoberfläche A .

Das Verändern der Kapazität eines Kondensators mit Hilfe der Plattenoberfläche hat die größere technische Bedeutung. Denken Sie an den Drehkondensator (Bild 17)! Das Verschieben der Platten und damit Ändern des Plattenab-

standes a ist meist nur noch im Labor für Versuchszwecke üblich.

3. Das Dielektrikum eines Elektrolytkondensators ist durch einen galvanischen Prozeß an der positiven Elektrode niedergeschlagen worden. Liegt an der positiven Elektrode ein Minuspol, dann kehrt sich der galvanische Prozeß um, und das Dielektrikum an der positiven Elektrode wird zerstört, der Elektrolytkondensator schlägt durch und ist nicht mehr brauchbar.
4. Wenn die Spannung an den Elektroden eines Kondensators so hoch ist, daß aus den geladenen Molekülen des Dielektrikums einzelne Elektronen herausgerissen und damit eine leitende Verbindung zwischen den beiden Elektroden entsteht, spricht man von einem Durchschlag des Kondensators. Im Normalfall wird ein Kondensator durch einen Durchschlag unbrauchbar (Bild 8). Eine besondere Stellung nimmt hierbei das Dielektrikum Luft ein, bei dem der Kondensator nach einem Durchschlag nicht unbrauchbar wird. Man spricht bei einem Kondensator mit dem Dielektrikum Luft nicht von einem Durchschlag, sondern von einem Überschlag.

5. Es sind folgende Analogien betrachtet worden:

Stromstärke I	Magnetfluß Φ
Stromdichte S	magnetische Induktion = Magnetflußdichte \mathcal{L}
elektrische Ursprungung E	magnetische Ursprungung \odot
elektrischer Spannungsabfall U	magnetischer Spannungsabfall V
elektrischer Widerstand R	magnetischer Widerstand R_m
Leitfähigkeit κ	Permeabilität μ
elektrische Feldstärke \mathcal{E}	magnetische Feldstärke \mathcal{H}

6. Das Feldbild einer stromdurchflossenen Spule ähnelt dem Feldbild eines permanenten Stabmagneten. Vergleichen Sie dazu das Bild 25, das Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule, mit dem Bild 26, dem Feldlinienbild eines Stabmagneten! Zwischen beiden Bildern besteht nur der Un-

terschied, daß man bei der stromdurchflossenen Spule auch die parallellaufenden Feldlinien im Innern der Spule erkennen kann (homogenes Feld). Aus dem Nordpol der Spule wie auch des Magneten quellen die Feldlinien und münden in den Südpol wieder ein.

7. Der magnetische Spannungsabfall V besteht zwischen zwei Punkten des magnetischen Kreises. Will man die magnetische Feldstärke \mathcal{H} zwischen diesen beiden Punkten des magnetischen Kreises berechnen, dann muß man den Quotienten aus Spannungsabfall V und Entfernung l der beiden Punkte bilden.
8. Dia-, para- und ferromagnetische Stoffe unterscheiden sich durch die relative Permeabilität μ_{rel} .
Bei den diamagnetischen Stoffen ist die relative Permeabilität $\mu_{\text{rel}} < 1$, sie setzen dem Magnetfluß einen großen Widerstand entgegen, paramagnetische Stoffe ($\mu_{\text{rel}} > 1$) haben einen geringen Widerstand. Bei den ferromagnetischen Stoffen ($\mu_{\text{rel}} \gg 1$) ist der magnetische Widerstand wesentlich kleiner als bei paramagnetischen Stoffen.
9. Als remanenten Magnetismus bezeichnet man den Restmagnetismus, der nach dem Magnetisieren in einem ferromagnetischen Stoff zurückbleibt. Will man den remanenten Magnetismus beseitigen, dann muß man den Stromfluß in der Spule, der magnetischen Urspannungsquelle, umkehren. Die zum Beseitigen des remanenten Magnetismus notwendige Feldstärke bezeichnet man als Koerzitivkraft.
10. Die relative Permeabilität μ_{rel} von ferromagnetischen Stoffen ist nicht, wie die der dia- und paramagnetischen Stoffe, konstant, sondern verringert sich mit steigender Induktion \mathcal{H} , bis sie am Sättigungspunkt (eine bestimmte Magnetflußdichte = magnetische Induktion \mathcal{B}) den Wert der relativen Permeabilität von Luft $\mu_{\text{rel}} = 1,000\ 0004$ erreicht. Dies ist auch die Ursache für die Form der Magnetisierungslinien der ferromagnetischen Stoffe.

11. Bei einer stromdurchflossenen Spule ohne Weicheisenkern laufen alle Feldlinien in Luft. Wie Ihnen bekannt ist, gehört Luft zu den paramagnetischen Stoffen und leitet im Vergleich zu den ferromagnetischen Stoffen den Magnetfluß Φ relativ schlecht. Setzt man in das Innere der Spule einen Weicheisenkern ein, also einen guten magnetischen Leiter, dann ist der magnetische Spannungsabfall in diesem Teil des magnetischen Kreises klein im Verhältnis zu dem übrigen Teil. Berechnet man die Feldstärke \mathcal{H} über dem Eisenkern und den Feldlinien außerhalb der Spule, dann stellt man fest, daß sich durch das Einfügen des Weicheisenkerns die Feldstärke außerhalb der Spule vergrößert (durch Vergrößern des magnetischen Spannungsabfalls).
12. Betrachten Sie dazu noch einmal das Bild 41!
- Der magnetische Kreis wird gebildet durch den U-förmigen Weicheisenkern, der die beiden Spulen S trägt, den Anker A und den Luftspalt zwischen Anker und U-förmigem Weicheisenkern. Nach der Uhrzeigerregel kann man die Polarität der Spulen bestimmen. Haben die Spulen auf beiden Schenkeln des Weicheisenkerns den gleichen Wicklungssinn, umfließt der Strom sie also in gleicher Richtung, dann ist die Polarität der dem Anker A zugewendeten Pole gleich, die magnetische Urspannung \ominus der einen Spule ist der anderen entgegengerichtet. Die magnetischen Urspannungen heben sich gegenseitig auf. Um dies zu vermeiden und beide magnetischen Urspannungen ähnlich wie Spannungsquellen hintereinanderschalten, gibt man den Spulen nicht den gleichen Wicklungssinn; die magnetischen Urspannungen addieren sich, damit verstärken sich der Magnetfluß Φ und die Feldstärke \mathcal{H} .

A n t w o r t e n u n d L ö s u n g e n

1. $a = 0,2 \text{ mm}$
 =====

2. Gegeben: die benötigten ϵ_r Gesucht: $C = ?$

$U = 500 \text{ V}$

$Q = ?$

$A = 81 \text{ cm}^2$

$a = 1 \text{ cm}$

Kapazität $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a} \quad (5)$

Ladungsmenge $Q = C \cdot U \quad (4)$

a) Glimmer ($\epsilon_r = 7$)

$$C = \frac{0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{cm}} \cdot 7 \cdot 81 \text{ cm}^2}{1 \text{ cm}}$$

$$= 50,2 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 50,2 \text{ pF}$$

=====

$$Q = 50,2 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 500 \text{ V} = 251 \cdot 10^{-10} \text{ As}$$

=====

b) Luft ($\epsilon_r = 1$)

$$C = 7,19 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 7,19 \text{ pF}$$

=====

$$Q = 7,19 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 500 \text{ V} = 35,6 \cdot 10^{-10} \text{ As}$$

=====

c) Azeton ($\epsilon_r = 21,5$)

$$C = 154 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 154 \text{ pF}$$

=====

$$Q = 154 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 500 \text{ V} = 770 \cdot 10^{-10} \text{ As}$$

=====

d) Kerafar ($\epsilon_r = 60$)

$$C = 431 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 431 \text{ pF}$$

=====

$$Q = 431 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 500 \text{ V} = 2155 \cdot 10^{-10} \text{ As}$$

$$= 0,2155 \cdot 10^{-6} \text{ As}$$

=====

e) Epsilon 7000 ($\epsilon_r = 7000$)

$$C = 50236 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 50236 \cdot 10^{-12}$$

$$Q = 50236 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 500 \text{ V} = 25118 \cdot 10^{-9} \text{ As} \\ = 2,5118 \cdot 10^{-5} \text{ As} \\ \text{=====}$$

$$3. Q = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ As} \\ \text{=====}$$

$$4. C_{\text{ers}} = \frac{1}{\frac{2}{5} \text{ F}} = \frac{2}{5} \mu\text{F} \\ \text{=====}$$

5. Gegeben: Keramikring

$$d_1 = 70 \text{ mm}$$

$$d_2 = 60 \text{ mm}$$

$$w = 250 \text{ (Cu)}$$

$$I = 2 \text{ A}$$

Gesucht: a) Θ = ?

$$b) R_m = ?$$

$$c) \Phi = ?$$

$$d) \mathcal{L} = ?$$

$$e) \mathcal{W} = ?$$

a) Magnetische Ursprung Θ der Spule

$$\Theta = I \cdot w = 2 \text{ A} \cdot 250 = 500 \text{ A} \\ \text{=====}$$

b) Magnetischer Widerstand R_m

$$R_m = \frac{1}{\mu \cdot A}$$

$$l = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{70 \text{ mm} + 60 \text{ mm}}{2} \cdot \pi = 204,1 \text{ mm} \\ = 20,41 \text{ cm}$$

$$A = r^2 \pi = \left(\frac{d_1 - d_2}{2} \right)^2 \cdot \pi = \left(\frac{70 \text{ mm} - 60 \text{ mm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \\ = 25 \text{ mm}^2 \cdot \pi = 78,5 \text{ mm}^2$$

$$R_m = \frac{20,41 \text{ cm}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot 0,785 \text{ cm}^2} = 20,7 \cdot 10^{+8} \frac{1}{\text{H}} \\ \text{=====}$$

c) Magnetfluß Φ

in diesem Kreis gilt $V = \Theta$

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{500 \text{ A}}{20,7 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{H}}} = \frac{500 \text{ A}}{20,7 \cdot 10^8 \frac{\text{A}}{\text{Vs}}} = 24,1 \cdot 10^{-8} \text{ Vs} \\ \text{=====}$$

d) Magnetische Induktion \mathcal{L}

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{I} = \frac{24,1 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}}{0,785 \text{ cm}^2} = 30,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

=====

Feldstärke \mathcal{H} ; da $V = \mathcal{H} \cdot l$

$$\mathcal{H} = \frac{V}{l} = \frac{500 \text{ A}}{20,41 \text{ cm}} = 24,5 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

=====

6. Gegeben: $I = 0,5 \text{ A}$

Gesucht: $w = ?$

$$\mathcal{L} = 15 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}$$

$$l_m = 35 \text{ cm}$$

$$\mathcal{H} = I \cdot w$$

$$w = \frac{\mathcal{H}}{I}$$

$$\mathcal{H} = V = \mathcal{L} \cdot l$$

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{L}}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot l$$

$$w = \frac{\mathcal{L} \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I} = \frac{15 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot 35 \text{ cm}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot 1 \cdot 0,5 \text{ A}}$$

$$= \frac{15 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot 35 \text{ cm}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot 1 \cdot 0,5 \text{ A}}$$

$$= 837 \text{ Windungen}$$

=====

7. Gegeben: $d = 3 \text{ cm}$

Gesucht: Windungen je cm = ?

$$I = 2 \text{ A}$$

$$\Phi = 20 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}$$

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

$$V = I \cdot w$$

$$w = \frac{V}{I} \quad \text{da } \mathcal{E} = V$$

$$V = R_m \cdot \Phi$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

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

$$R_m = \frac{1 \cdot 4}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot d^2 \cdot \pi}$$

$$V = \frac{4 \cdot 1 \cdot \Phi}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot d^2 \cdot \pi}$$

$$w = \frac{4 \cdot 1 \cdot \Phi}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot d^2 \cdot \pi \cdot I} = \frac{4 \cdot 1 \text{ cm} \cdot 20 \cdot 10^{-8} \text{ Vs}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot 9 \text{ cm}^2 \cdot 3,14 \cdot 2 \text{ A}}$$

$$= 1,13 \text{ Windungen je cm}$$

=====

8. Gegeben: Luftspalt $l = 0,1 \text{ cm}$
 $A = 5 \text{ cm}^2$

Gesucht: $R_m = ?$

$$R_m = \frac{1}{\mu \cdot A} = \frac{0,1 \text{ cm}}{1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot 1 \cdot 5 \text{ cm}^2}$$

$$= 0,0159 \cdot 10^8 \frac{\text{A}}{\text{Vs}}$$

$$= 0,0159 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{H}}$$

=====

Literatur-Nachweis

- Kammerloher, Elektrotechnik des Rundfunktechnikers,
Teil I, Gleichstrom,
Fachbuchverlag, Leipzig 1956
- Lindner, Lehrbuch der Physik, Band III,
Fachbuchverlag, Leipzig 1957
- Reth, Grundlagen der Elektrotechnik,
Verlag Volk und Wissen, Berlin 1958
- Schönfeld, Die wissenschaftlichen Grundlagen
der Elektrotechnik,
Hirzel-Verlag, Leipzig 1952

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

GRASSLER/HENNIG

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHELEKTRO- TECHNIKER

4

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHÜLAUS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
DRESDEN

5030-04/63



1963

ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 4

von

Dipl.-Ing. oec. Rolf Gräßler und
Dipl.-Gwl. Raimund Hennig

2. Auflage

Herausgeber:
Zentralstelle für Fachschulausbildung
Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 1,50

Ag 616/ 115 /63

Best.-Nr. 5030-04/63

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1.7. Elektromagnetische Erscheinungen (Fortsetzung)	3
1.7.4. Die Kraftwirkung des magnetischen Feldes	3
1.7.4.1. Kraftwirkungen zwischen zwei Stromleitern	3
1.7.4.2. Bewegliche Stromleiter im mag- netischen Feld	6
1.7.4.3. Technische Anwendungen	12
1.7.5. Induktionswirkung des magnetischen Feldes	14
1.7.5.1. Grundlagen	14
1.7.5.2. Elektromagnetische Induktion in Spulen	17
1.7.5.3. Das Induktionsgesetz	20
1.7.5.4. Die Selbstinduktion	23
1.7.5.5. Wirbelströme	26
1.7.5.6. Technische Anwendungen der elektro- magnetischen Induktion	28
Antworten auf die Wiederholungsfragen	34
Antworten und Lösungen	35

1.7. Elektromagnetische Erscheinungen (Fortsetzung)

1.7.4. Die Kraftwirkung des magnetischen Feldes

Aus eigener Anschauung und Erfahrung wissen Sie, daß gleichnamige Magnetpole einander abstoßen und ungleichnamige Magnetpole einander anziehen. Das wurde auch im Lehrbrief 3, Abschnitt 1.7.1. nochmals wiederholt. Diese Tatsache ist die Folge der von den Magnetpolen ausgehenden Felder und deren Eigenschaften.

Wenn diese Behauptung gilt, dann können wir weiter schlußfolgern, daß auch stromdurchflossenen Leiter Kräfte aufeinander ausüben, da sie ebenfalls von Magnetfeldern umgeben sind. Man kann daher von der Art der Träger der Magnetfelder abstrahieren und es gilt die Behauptung:

Benachbarte magnetische Felder üben aufeinander Kräfte aus.

Diese Überlegungen sollen in den folgenden Abschnitten genauer untersucht werden.

1.7.4.1. Kraftwirkungen zwischen zwei Stromleitern

Die in den Bildern 1 und 3 dargestellten Versuche bestätigen die weiter oben gemachte Aussage über das Verhalten von benachbarten Feldern zueinander. Die dabei möglichen zwei Richtungen der Kraftwirkung werden hervorgerufen durch entsprechende Stromführung in den Leitern.

Zwei parallele Leiter, die vom Strom in gleicher Richtung durchflossen werden und beweglich aufgehängt sind, ziehen einander an.

Die Erklärung für dieses Verhalten finden Sie aus den Bildern 2a und b. Dort ist das Feldlinienbild zweier parallel und in gleicher Richtung verlaufenden Ströme dargestellt (Faustregel! Lbf. 3, Ab-

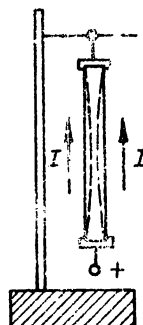


Bild 1: Kraftwirkung zwischen zwei Stromleitern mit gleicher Stromrichtung

schnitt 1.7.2.1.).

Beide Leiter sind also von jeweils einem magnetischen Feld umgeben (gestrichelte Linien). Die Feldlinien dieser beiden magnetischen Felder haben Kreuzungspunkte, an denen jeweils zwei Kräfte wirken, die sich nach dem Parallelogrammsatz zusammensetzen. Aus den beiden Feldlinien bildet sich eine resultierende Feldlinie, die die beiden Leiter umschließt (voll ausgezogene Linien). Da alle Feldlinien das Bestreben haben, sich zu verkürzen, bewirken die resultierenden Feldlinien,

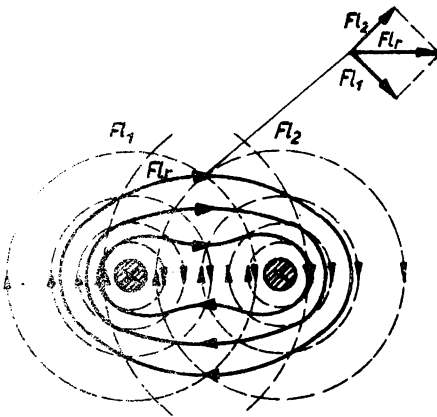


Bild 2a: Schematische Darstellung eines magnetischen Feldes zweier paralleler Leiter mit gleicher Stromrichtung

daß die beiden Leiter gegeneinander gedrückt werden. Es herrscht also eine Anziehungskraft zwischen zwei in der gleichen Richtung vom Strom durchflossenen Leitern.

Die resultierenden Feldlinien können Sie ganz deutlich in der Fotografie eines durch Eisenfeilspäne sichtbar gemachten magnetischen Feldes zweier in gleicher Stromrichtung durchflossener paralleler Leiter erkennen (Bild 2b).



Bild 2b: Fotografie eines magnetischen Feldes zweier paralleler Leiter mit gleicher Stromrichtung

Betrachten Sie jetzt das Bild 3!

Bei dieser Versuchsanordnung fließt in den beiden Leitern der Strom in entgegengesetzter Richtung. Bei diesem Versuch stellt man fest, daß sich zwei Leiter, die vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, ab-

stoßen.

Die Erklärung für dieses Verhalten finden Sie wiederum aus dem Feldlinienbild (Bild 4a) Die Feldlinien der beiden Leiter sind wieder durch die gestrichelten Linien dargestellt. An den Kreuzungspunkten der Feldlinien der beiden Magnetfelder treffen zwei Kräfte aufeinander, die sich nach dem Parallelogrammsatz zusammensetzen lassen. Man erhält so die resultierenden Feldlinien der beiden Felder (volle Feldlinien), die ein Abstoßen der beiden Leiter bewirken, weil sich das Feld zwischen den Leitern verstärkt und damit die Leiter auseinandergedrückt. Dies ist auch ganz deutlich an der Fotografie des magnetischen Feldes zweier entgegengesetzt vom Strom durchflossener Leiter zu erkennen (Bild 4b).

Merken Sie sich daher:

Parallele Leiter, die vom Strom in gleicher Richtung durchflossen werden, ziehen einander an.

Parallele Leiter, die vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, stoßen einander ab.

Diese Wirkung des magnetischen Feldes hat man benutzt, um die Einheit der Stromstärke zu definieren (Verordnung vom 14. Aug. 1958). Lesen Sie

nochmals diese Festlegung im Lehrbrief 1 auf Seite 15 nach!

Ersetzt man die beiden Leiter durch zwei Spulen, die beweg-

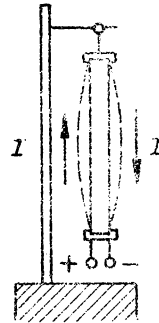


Bild 3: Kraftwirkung zwischen zwei Stromleitern mit entgegengesetzter Stromrichtung

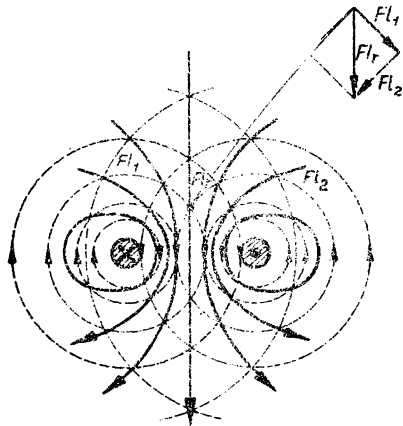


Bild 4a: Schematische Darstellung eines magnetischen Feldes zweier paralleler Leiter mit entgegengesetzter Stromrichtung

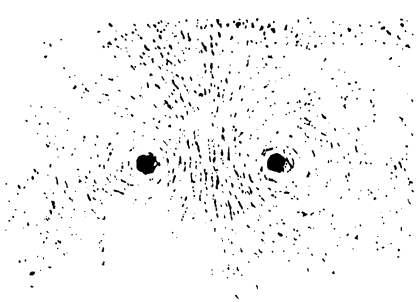


Bild 4b: Fotografie eines magnetischen Feldes zweier paralleler Leiter mit entgegengesetzter Stromrichtung

lich aufgehängt sind (Bild 5a und b), dann wirken diese Spulen wie Stabmagnete, deren Verhalten Sie schon im Lbf. 3, Abschn. 1.7.1. und 1.7.2.1. kennengelernt haben:

Stromspulen mit gegenüberliegenden ungleichen Polen ziehen einander an (Bild 5a), und Stromspulen mit gegenüberliegenden gleichen Polen stoßen einander ab (Bild 5b).

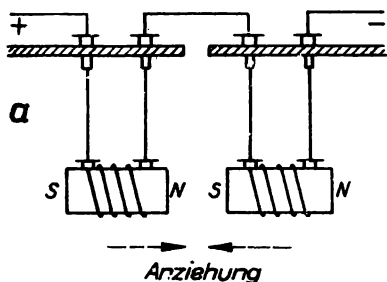


Bild 5a: Stromspulen mit gegenüberliegenden ungleichen Polen

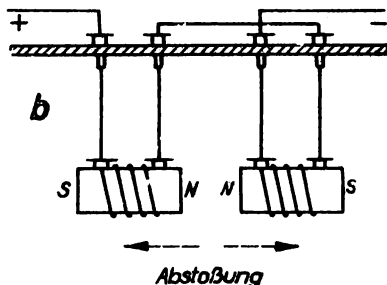


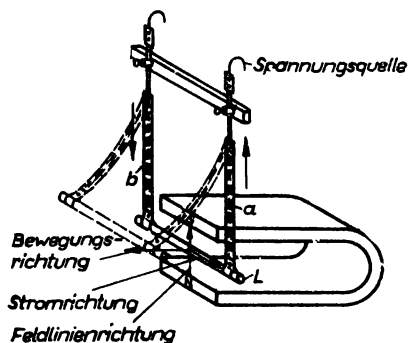
Bild 5b: Stromspulen mit gegenüberliegenden gleichen Polen

1.7.4.2. Bewegliche Stromleiter im magnetischen Feld

Unsere bisherigen Betrachtungen waren auf die Untersuchung der Wirkungen der Magnetfelder von zwei parallelen Leitern und Stromspulen gerichtet. In diesem Abschnitt soll das Verhalten eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld untersucht werden.

Betrachten Sie dazu das Bild 6!

Ein Leiter L ist an beweglichen Metallbändern a und b so aufgehängt, daß er zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten hängt. Wenn kein Strom durch den Leiter L fließt, hängt er vollkommen ruhig senkrecht. Wird der Leiter an eine Spannungsquelle angeschlossen, fließt durch ihn also ein Strom in der im Bild 6 angegebenen Richtung, dann erfolgt Bild 6: Stromleiter im Magnetfeld



Leiters nach links; er wird aus dem magnetischen Feld des Hufeisenmagneten herausgetrieben und bleibt in dieser schrägen Stellung so lange stehen, wie der Stromfluß anhält.

Was ist die Ursache für die Bewegung des Leiters? Die Erklärung finden Sie, wenn Sie sich die magnetischen Felder des Hufeisenmagneten und des Leiters genauer betrachten (Bild 7). Bild 7a zeigt Ihnen die magnetischen Felder des Hufeisenmagneten und des Leiters (Faustregel) mit der im Bild 6 angegebenen Stromrichtung. Wie Ihnen aus 1.7.4.1. bekannt ist, beeinflussen sich die beiden magnetischen Felder (FL_M und FL_L). Nach dem Kräfteparallelogramm entsteht ein resultierendes Feld (FL_R), das in Bild 7b dargestellt ist.

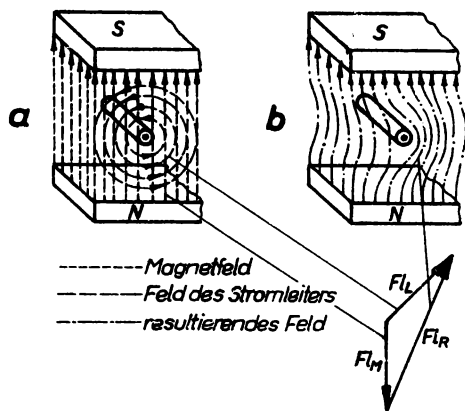


Bild 7: Überlagerung des Magnetfeldes eines Hufeisenmagneten mit dem eines stromdurchflossenen Leiters

Aus dem Bild 7b ist zu ersehen, daß sich das resultierende Feld nach rechts verdichtet und nach links verdünnt. Da die einzelnen Feldlinien das Bestreben haben, sich zu verkürzen, wird der Leiter nach der schwächsten Feldseite abgedrängt.

Rein schematisch kann man die Bewegungsrichtung des Leiters mit der "Linken-Hand-Regel", die vielfach auch als "Motorregel" bezeichnet wird, bestimmen.

Wenn man die offene linke Hand so in das Magnetfeld hält, daß die Feldlinien in die innere Handfläche eintreten und die Fingerspitzen in die Stromrichtung zeigen, dann gibt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an (Bild 8).

Wie Sie bei diesem Versuch gesehen haben, erfolgt eine Umwand-

lung von Energie. Dem Leiter wird elektrische Energie zugeführt, die er in magnetische Energie umformt. Durch das Zusammenstoßen von zwei magnetischen Feldern erfolgt eine nochmalige Energieumwandlung von magnetischer in mechanische Energie. Es ist also möglich, über das magnetische Feld elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln.

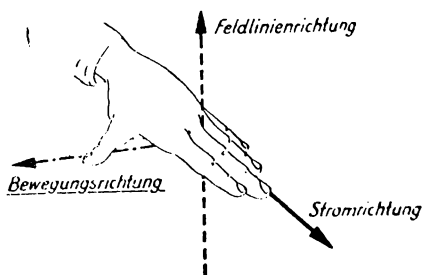


Bild 8: Bestimmung der Bewegungsrichtung durch die "Linke-Hand-Regel"

Die auf den Leiter wirkende Kraft F ist proportional der magnetischen Induktion \mathfrak{B} , der Stromstärke I , die im Leiter auftritt, und der Leiterlänge l innerhalb des magnetischen Feldes des Hufeisenmagneten:

$$F = \mathfrak{B} \cdot I \cdot l$$

(1)

Setzen wir in diese Gleichung die bekannten Einheiten für die

magnetische Induktion $[B] = \frac{Vs}{cm^2}$, für die Stromstärke $[I] = A$ und für die Leiterlänge $[l] = cm$, dann erhält man folgende Einheitengleichung:

$$\text{Einheit der Kraft } [F] = \frac{Vs}{cm^2} \cdot A \cdot cm$$

oder anders geschrieben:

$$= \frac{VAS}{cm} = \frac{Ws}{cm}$$

Nach Lbf. 2, Tafel 2, ist es möglich, $1 Ws \hat{=} 0,102 kpm$ zu setzen.

Demnach kann man auch schreiben:

$$F = 0,102 \cdot \frac{kpm}{cm} = \frac{0,102 kpm \cdot 100 kpcm}{kpm} \\ = 10,2 kp$$

Wenn man die Kraft in Kilopond (kp) ermitteln will und die magnetische Induktion B in $\frac{Vs}{cm^2}$, die Stromstärke I in A und die Leiterlänge l in cm einsetzt, dann ist es notwendig, die Gleichung (1) in folgender Form zu schreiben:

$$F = 10,2 \frac{kpcm}{Ws} \cdot B \cdot I \cdot l$$

Lehrbeispiel 1

In einem Magnetfeld mit einer magnetischen Induktion

$B = 15\,000 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{cm^2}$ befindet sich ein Leiter, in dem ein Strom der Stärke $I = 10 A$ fließt. Die Länge des im Magnetfeld befindlichen Leiters beträgt $l = 30 cm$. Berechnen Sie die Kraft, die auf den Leiter durch das Magnetfeld ausgeübt wird!

Lösung:

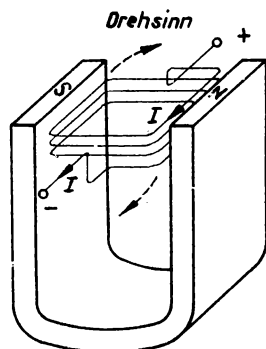
$$F = 10,2 \frac{kpcm}{Ws} \cdot B \cdot I \cdot l \\ = 10,2 \frac{kpcm}{Ws} \cdot 15\,000 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{cm^2} \cdot 10 A \cdot 30 cm \\ = 10,2 \frac{kpcm}{Ws} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \frac{VAS cm}{cm^2}$$

$$= 10,2 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \text{ kp}$$

$$F = 0,459 \text{ kp}$$

=====

Wie Sie beim Rechnen dieses Beispiels gesehen haben, ist es sehr wichtig, die Einheiten der einzelnen Größen zu beachten. Lassen Sie aus diesem Grunde niemals bei den einzelnen Größen die Einheiten weg, Sie ersparen sich dadurch sehr viele Fehler.



Bisher haben wir das Verhalten eines geraden stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld untersucht. Der jetzt beschriebene Versuch zeigt das Verhalten einer Spule im Magnetfeld. Betrachten Sie dazu das Bild 9!

Im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten ist eine Spule wie im Bild 9 dargestellt, drehbar angeordnet. Wird ein Strom durch die Windungen der Spule geleitet, so dreht sie sich, wie die gestrichelten Pfeile angeben.

Bild 9: Stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

Will man auf die Spule die "Linke-Hand-Regel" anwenden, so muß man dies jeweils für die einzelnen Spulenhälften gesondert tun. Es wirkt auf die linke Seite der Spule eine nach oben gerichtete und auf die rechte Seite eine nach unten gerichtete Kraft ein.

Da beide Kräfte gleich groß sind und zwischen ihnen der Abstand d besteht, kommt es zu einer Drehbewegung. Diese wird durch das Drehmoment M dargestellt, das man als Kräftepaar aus dem Produkt von der Größe und dem Abstand der beiden Kräfte ermittelt.

$$M = F \cdot d$$

(2)

Durch die Anzahl der Windungen der Spule w vergrößert sich die wirksame Leiterlänge ($l \cdot w$) und damit auch die Kraft F . Somit läßt sich die Kraft einer Spule nach der Gleichung (1), die um

den Faktor w (Anzahl der Windungen der Spule) zu erweitern ist, ermitteln.

$$F = \mathfrak{B} \cdot I \cdot l \cdot w$$

Als Drehmoment der Spule erhält man demnach

$$M = \mathfrak{B} \cdot I \cdot l \cdot w \cdot d \quad (2a)$$

M = Drehmoment der Spule

\mathfrak{B} = magnetische Induktion im Luftspalt
des Hufeisenmagneten

I = Stromstärke in der Spule

l = Spulenlänge

w = Leiteranzahl

d = mittlerer Spulendurchmesser

Die Bewegungsrichtung der Spule läßt sich durch Verändern der Stromrichtung oder durch Vertauschen der Magnetpole umkehren.

Lehrbeispiel 2

Ein Elektromotor hat einen 25 cm langen Anker, der in einem magnetischen Feld von $\mathfrak{B} = 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ drehbar gelagert ist und $w = 1\,500$ Windungen besitzt.

- Berechnen Sie die Kraft F , die auf den Anker wirkt, wenn der Ankerstrom 20 A beträgt!
- Berechnen Sie das Drehmoment M des Ankers, wenn dessen Durchmesser 20 cm beträgt!

Lösung :

$$\begin{aligned} \text{a) } F &= 10,2 \frac{\text{kpcm}}{\text{Vs}} \cdot \mathfrak{B} \cdot I \cdot l \cdot w \\ &= 10,2 \frac{\text{kpcm}}{\text{Vs}} \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot 20 \text{ A} \cdot 25 \text{ cm} \cdot 1\,500 \\ &= 10,2 \frac{\text{kpcm}}{\text{Vs}} \cdot 75 \frac{\text{VAs cm}}{\text{cm}^2} \\ F &= 765 \text{ kp} \\ &===== \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b) } M &= F \cdot d \\
 &= 765 \text{ kp} \cdot 20 \text{ cm} = 15\,300 \text{ kpcm} \\
 M &= 153 \text{ kpm} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

1.7.4.3. Technische Anwendungen

Die wichtigste technische Anwendung dieser Kraftwirkung finden wir in den Elektromotoren. Man verwendet jedoch zur Erzeugung des magnetischen Feldes im allgemeinen keine permanenten Hufeisenmagneten, sondern Elektromagneten. (Speziell behandeln wir die Motoren in den folgenden Lehrbriefen 6 - 8.)

Eine weitere Anwendung finden Sie in dem im Lbf. 1 behandelten Drehspulinstrument. Wie Sie im Bild 10 (schematische Abbildung eines Drehspulinstruments) erkennen, besteht zwischen diesem Bild und dem Bild 9 (stromdurchflossene Spule im Magnetfeld) eine große Ähnlichkeit. Die Drehspule DS ist im Feld eines Hufeisenmagneten H drehbar gelagert. Nach der Gleichung (2a)

$$M = \mathfrak{B} \cdot I \cdot l \cdot w \cdot d$$

ist das Drehmoment M, wenn die übrigen Größen (magnetische Induktion \mathfrak{B} , Spulenlänge l, Leiteranzahl w in der Spule und mittlerer Spulendurchmesser d) konstant sind, proportional der durch die Spule fließenden Stromstärke I. Nach diesem Prinzip ist es möglich, die empfindlichsten und genauesten Gleichstrommeßgeräte zu bauen.

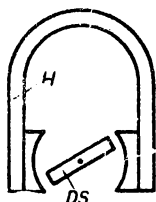


Bild 10: Schema
eines
Drehspulmeßgerätes

Zusammenfassung

=====

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. Die magnetischen Felder zweier vom Strom durchflossenen Leiter überlagern sich, und es bildet sich ein resultierendes Magnetfeld. Als Folge dieser Überlagerung tritt eine Kraftwirkung auf.

Parallele Leiter, die vom Strom in gleicher Richtung durchflossen werden, ziehen einander an; parallele Leiter, die vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, stoßen einander ab.

Ähnlich, nur im verstärkten Maße, tritt diese Kraftwirkung auch bei Stromspulen auf:

Stromspulen mit gegenüberliegenden ungleichen Polen ziehen einander an, Stromspulen mit gegenüberliegenden gleichen Polen stoßen einander ab.

Die gleiche Erscheinung der Kraftwirkung des magnetischen Feldes ist auch bei einem stromdurchflossenen Leiter, der beweglich aufgehängt ist, in dem Feld eines Hufeisenmagneten zu verzeichnen. Die Bewegung dieses Leiters kann man nach der "Linken-Hand-Regel" oder "Motorregel" bestimmen:

Wenn man die offene linke Hand so in das Magnetfeld hält, daß die Feldlinien in die innere Handfläche eintreten und die Fingerspitzen in die Stromrichtung zeigen, dann gibt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

Die auf den Leiter wirkende Kraft kann man durch folgende Gleichung bestimmen:

$$F = \mathcal{L} \cdot I \cdot l$$

Das Drehmoment einer stromdurchflossenen Spule im magnetischen Feld ist durch folgende Gleichung zu berechnen:

$$M = F \cdot d$$

$$= \mathcal{L} \cdot I \cdot l \cdot w \cdot d$$

Dieses Prinzip der Kraftwirkung einer stromdurchflossenen

Spule wendet man vor allem bei den Elektromotoren und den Drehspulinstrumenten an.

Wiederholungsfragen

=====

1. Welche Möglichkeiten bestehen, die Drehrichtung einer stromdurchflossenen Spule (Bild 9) im Magnetfeld umzukehren?
2. Was geschieht mit den Sammelschienen in einem Kraftwerk (zwei parallele Leiter mit entgegengerichtetem Stromfluß), wenn auf sie der volle Kurzschlußstrom der Generatoren wirkt?
3. Tritt eine Veränderung der Drehrichtung eines Motors ein, wenn gleichzeitig das Magnetfeld und der Ankerstrom umgekehrt werden?

Ü b u n g

1. Wie groß muß der Ankerstrom in einem Elektromotor sein, wenn ein Drehmoment von $M = 100 \text{ kpm}$ erreicht werden soll, die magnetische Induktion $= 7\,500 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$, die Leiterzahl $w = 1\,250$, die Ankerlänge $l = 35 \text{ cm}$ und der Ankerdurchmesser $d = 25 \text{ cm}$ beträgt?

1.7.5. Kapitel: Induktionswirkung des magnetischen Feldes

1.7.5.1. Grundlagen

Im vorhergehenden Kapitel lernten Sie die Tatsache kennen, daß stromdurchflossene Leiter Magnetfelder erzeugen und daß infolge Überlagerung dieser Magnetfelder eine Kraftwirkung auftritt. Der englische Physiker Michael Faraday fand im Jahre 1831, daß dieser Vorgang (Kraftwirkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld) umkehrbar ist.

Verfolgen wir noch einmal den Versuch, der im Bild 6 dargestellt ist, nur mit dem Unterschied, daß jetzt nicht der beweglich aufgehängte Leiter mit einer Spannungsquelle, son-

dern mit einem sehr empfindlichen Galvanometer verbunden ist (Bild 11).

Wird der Leiter in der im Bild angegebenen Richtung bewegt, so erfolgt ein kurzer Ausschlag des Galvanometers; kehrt man die Bewegung um, dann schlägt das Galvanometer ebenfalls aus, nur in entgegengesetzter Richtung. Durch die Bewegung des Leiters im magnetischen Feld wird in dem Leiter eine Urspannung erzeugt, und es fließt ein Strom, dessen Richtung von der Bewegungsrichtung des Leiters abhängig ist. Bewegt sich jedoch der Leiter nicht mehr, kann auch keine Urspannung induziert werden, also auch kein Strom fließen.

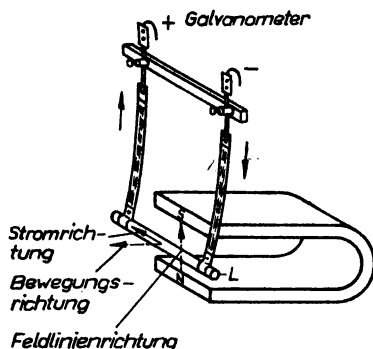


Bild 11: Versuchsanordnung zum Nachweis eines Induktionsstromes

Diesen Vorgang bezeichnet man

als elektromagnetische Induktion, die erzeugte Urspannung als induzierte Urspannung und den dadurch verursachten Strom als Induktionsstrom (Lbf. 1, S. 31 f).

Aus diesem Versuch ist zu erkennen, daß zwischen der Feldlinienrichtung, der Bewegungsrichtung des Leiterstückes L und der Richtung des induzierten Stromes ein Zusammenhang besteht. Das Bestimmen der einzelnen Richtungen (Feldlinien-, Bewegungs- und Stromrichtung) ist durch die "Rechte-Hand-Regel", die vielfach auch als Generatorregel bezeichnet wird, möglich:

Wenn man die offene rechte Hand so in das Magnetfeld hält, daß die Feldlinien in die innere Handfläche eintreten und der Daumen die Bewegungsrichtung anzeigt, dann geben die ausgestreckten Finger die Richtung der induzierten Urspannung an (Bild 12).

Wie der beschriebene Versuch zeigt, ist es möglich, durch Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld eine Urspannung zu erzeugen.

Wenn durch die elektromagnetische Induktion in dem Leiter eine Urspannung erzeugt wird und auch ein Strom fließt, gewinnt man elektrische Energie. Wie Ihnen aus Lbf. 2 bekannt ist, kann man nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie keine Energie neu schaffen, sondern nur eine Energieform in eine andere umwandeln.

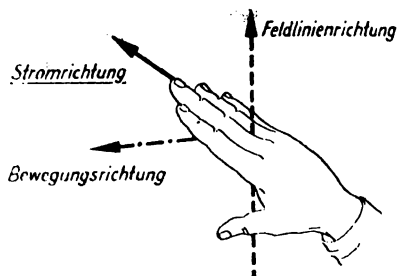


Bild 12: Rechte-Hand-Regel

Um die Energieumwandlung näher zu betrachten, wollen wir uns mit dem Feldlinienbild der im Bild 11 dargestellten Versuchsanordnung beschäftigen.

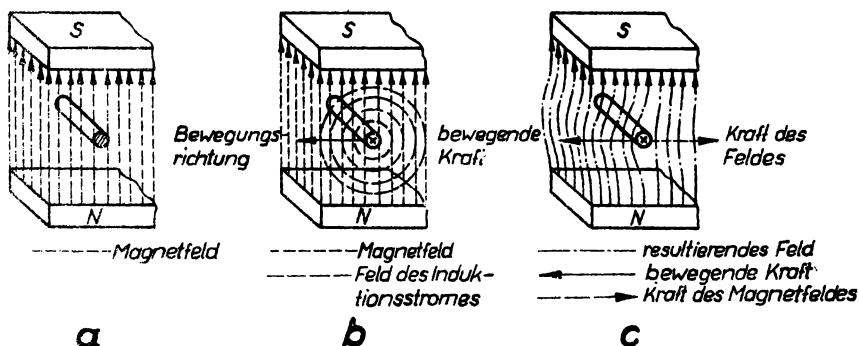


Bild 13a - c

Bild 13a zeigt den ruhenden Leiter im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten; in dem Leiter fließt kein Induktionsstrom, weil keine Feldlinien geschnitten werden. Bewegt man den Leiter, schneidet er also Feldlinien, dann wird in ihm eine Urspan-

nung induziert; es fließt ein Strom, der ein Magnetfeld um den Leiter hervorruft (Bild 13b). Das Magnetfeld des Leiters überlagert sich mit dem Magnetfeld des Hufeisenmagneten, und nach dem Kräfteparallelogramm bildet sich ein resultierendes Magnetfeld (Bild 13c).

Das Bild 13c zeigt ganz deutlich, daß das resultierende Feld auf den Leiter eine Kraft ausübt, die versucht, ihn nach rechts zu drücken (alle Kraftlinien haben das Bestreben, sich zu verkürzen, die Kraftlinien links des Leiters üben auf den Leiter eine Kraft nach rechts aus). Diese Kraft muß, damit der Leiter bewegt werden kann (und das ist ja die Voraussetzung für den Stromfluß), von der bewegendenden Kraft überwunden werden. Die bewegendende Kraft ist demnach die Voraussetzung für das Fließen des Induktionsstromes. Das Entstehen des Induktionsstromes ist also mit einer Arbeit verknüpft, wie es auch nach dem Energiesatz der Fall sein muß; denn diese mechanische Arbeit ist das energetische Äquivalent für die elektrische Energie des Induktionsstromes.

Für diesen Vorgang gilt die Lenzsche Regel (H.F.E. Lenz, 1804 - 1865, folgerte 1834 dieses Gesetz aus dem Prinzip der Gleichheit von Aktio und Reaktio):

Der Induktionsstrom ist immer so gerichtet, daß er die Ursache seiner Entstehung (die Bewegung) zu hemmen versucht!

1.7.5.2. Elektromagnetische Induktion in Spulen

Ein stärkerer Induktionsstrom kann erzeugt werden, wenn man statt eines einfachen Leiters eine Spule benutzt. Bei dieser Form des Induktionsvorganges ist nicht das Schneiden von Kraftlinien entscheidend, sondern das Ändern des von der Spule umfaßten Magnetflusses Φ . Betrachten Sie dazu das Bild 14!

In einer Spule, die mit einem Galvanometer verbunden ist, wird ein Stabmagnet bewegt. Durch das Bewegen des Stabmagneten ändert sich die Größe des von der Spule umfaßten Magnetflusses und es wird eine Urspannung induziert. Dadurch fließt

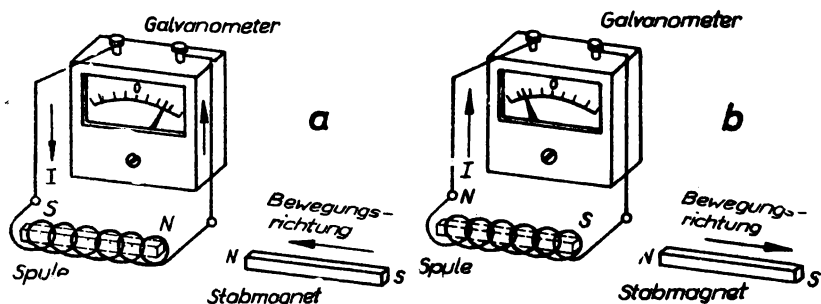


Bild 14: Versuchsanordnung zur Erzeugung von Induktionsströmen in Spulen

- a) bei Zunahme des von der Spule umfaßten Magnetflusses
- b) bei Abnahme des von der Spule umfaßten Magnetflusses

ein Induktionsstrom I , der durch den Ausschlag des Galvanometers angezeigt werden kann.

Die Richtung des Induktionsstromes läßt sich nach der Uhrzeigerregel bestimmen (dabei bleibt der Wickelsinn der Spule unberücksichtigt):

Blickt man in Richtung der Feldlinien und nimmt der von der Spule umfaßte Fluß zu, dann fließt der Induktionsstrom entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn (Bild 14a), nimmt dagegen der von der Spule umfaßte Magnetfluß ab, dann fließt der Induktionsstrom im Uhrzeigersinn (Bild 14b).

Zur Erzeugung von Induktionsströmen ist nicht unbedingt eine Bewegung und ein Dauermagnet notwendig. Wie Sie wissen, breitet sich um jede stromdurchflossene Spule ein magnetisches Feld aus.

Es ist daher ohne weiteres möglich, statt eines Dauermagneten eine vom Strom durchflossene Spule zu verwenden. Allgemein wird diese Spule als Primärspule bezeichnet. Den Eisenkern der Primärspule formt man so, daß der Magnetfluß Φ nur im Eisen strömen kann, daß also der magnetische Kreis nur einen kleinen magnetischen Widerstand hat. Auf den Eisenkern wickelt

man noch eine Spule, die Sekundärspule. Sie hat keinerlei elektrische (leitende) Verbindung mit der Primärspule.

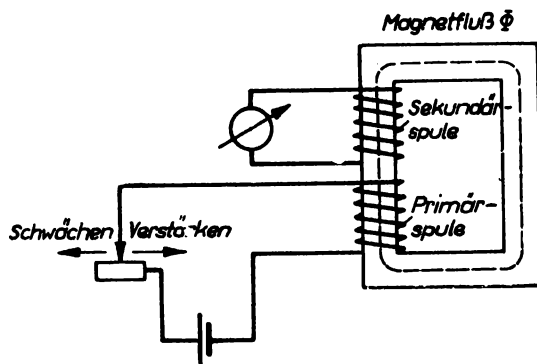


Bild 15: Erzeugung von Induktionsströmen durch Verändern des Magnetflusses eines Elektromagneten

Ändert man den Strom in der Primärspule und damit den Magnetfluß im magnetischen Kreis, indem der Schleifkontakt des Widerstandes nach rechts oder links bewegt wird, so wird in der Sekundärwicklung eine Urspannung induziert und damit ein Strom angetrieben.

Nach der Uhrzeigerregel ist es möglich, die Richtung des Induktionsstromes zu bestimmen. Betrachten Sie dazu das Bild 16a!

Bewegt man den Schleifkontakt des Schiebewiderstandes in Bild 15 nach rechts, steigt der Primärstrom an, der Magnetfluß nimmt zu. Nach der "Faustregel" (Ibf. 3, 1.7.2.1.) laufen die Feldlinien bei der angegebenen Stromrichtung in das Bild hinein. Nach der Uhrzeigerregel fließt der Induktionsstrom, wenn man in Richtung der Feldlinien blickt und der von der Spule umfaßte Fluß zunimmt, entgegen dem Uhrzeigersinn, im Bild 16a also in entgegengesetzter Richtung des Primärstromes.

Beim Schwächen des Primärstromes haben zwar die Feldlinien die gleiche Richtung, aber es vermindert sich der von der Spule umfaßte magnetische Fluß Φ . Nach der Uhrzeigerregel

fließt dann der Induktionsstrom im Uhrzeigersinn (Bild 16b). Beachten Sie bei Bild 16a und b, daß durch Verstärken und Schwächen des Primärstromes - aber unter Beibehaltung der Richtung - sich die Richtung des Induktionsstromes in der Sekundärspule umkehrt.

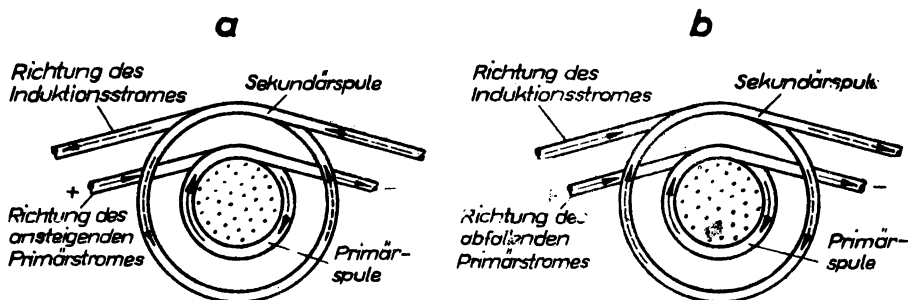


Bild 16

- a) Richtung des Induktionsstromes beim Steigen des Primärstromes und damit Vermehren des Magnetflusses
- b) Richtung des Induktionsstromes beim Fallen des Primärstromes und damit Vermindern des Magnetflusses

1.7.5.3. Das Induktionsgesetz

Aus den eben beschriebenen Versuchen ist das Induktionsgesetz abzuleiten.

In einem geschlossenen Leiterkreis (einer Spule) wird eine Urspannung induziert, wenn und solange sich der von ihm umfaßte Magnetfluß Φ ändert.

Die induzierte Urspannung in der Sekundärspule ist um so größer, je stärker sich der Magnetfluß Φ in einer bestimmten Zeiteinheit ändert. Aus der Mathematik ist Ihnen bekannt, daß man für kleine Differenzen den griechischen Buchstaben Δ (Delta) setzen kann. Für die Magnetflußänderung während einer bestimmten Zeitdauer kann man schreiben:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Hierbei bedeutet Δt eine Zeitdauer und $\Delta \Phi$ die Magnetfluß-Änderung während dieser Zeitdauer. Wie bereits gesagt, ist die induzierte Urspannung der Magnetflußänderung proportional. Diese Feststellung in Gleichungsform geschrieben, lautet:

Induktionsgesetz

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3)$$

Das negative Vorzeichen dieser Gleichung ist durch die Lenzsche Regel begründet, wonach jeder Induktionsstrom (als Folge der induzierten Urspannung) die Ursache seiner Entstehung zu hemmen versucht.

Allgemein gesagt:

Der Induktionsstrom ist immer seiner Entstehungsursache entgegengerichtet!

Will man die Induktionsspannung einer Spule berechnen, dann muß die Gleichung des Induktionsgesetzes mit der Windungszahl w multipliziert werden:

$$E = w \cdot - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (3a)$$

Lehrbeispiel 3

Eine Zylinderspule von 30 cm Länge und 28,3 cm² Fläche trägt als Primärwicklung 1 000 Windungen und als Sekundärwicklung 2 000 Windungen. Den Primärstrom läßt man innerhalb von 3 s gleichförmig von 0,1 A auf 10 A anwachsen. Welche Urspannung wird während dieser Zeit induziert (μ_{rel}) von Luft = 1?

Gegeben: $l_{\text{Sp}} = 30 \text{ cm}$

Gesucht: $E_{\text{ind}} = ?$

$A_{\text{Sp}} = 28,3 \text{ cm}^2$

$w_{\text{P}} = 1000$

$$w_S = 2000$$

$$\mu_r = 1$$

$$I_1 = 0,1 \text{ A}$$

$$I_2 = 10 \text{ A}$$

$$t = 3 \text{ s}$$

L ö s u n g :

$$E = w \cdot - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

$$\Phi_1 = \frac{\ominus}{R_m}$$

$$\ominus = I \cdot w_P$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \cdot w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1}$$

$$\Phi_2 = \frac{I_2 \cdot w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1}$$

$$\Delta \Phi = \frac{I_2 \cdot w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1} - \frac{I_1 \cdot w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1}$$

$$= (I_2 - I_1) \frac{w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1}$$

$$(I_2 - I_1) \cdot \frac{w_P \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{1}$$

$$E = - w_S \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - 2000 \cdot \frac{9,9 \text{ A} \cdot \frac{1000 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot 28,3 \text{ cm}^2}{30 \text{ cm}}}{3 \text{ s}}$$

$$= - 2000 \cdot \frac{9,9 \text{ A} \cdot 1185 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}}{3 \text{ s}}$$

$$E = - 7,816 \cdot 10^{-2} \text{ V} = - 78,16 \text{ m V}$$

=====

1.7.5.4. Die Selbstinduktion

Wie Sie aus den bisherigen Versuchen gesehen haben, bildet sich um jeden stromführenden Leiter ein Magnetfeld, dessen Magnetfluß Φ sich beim Ein- und Ausschalten verändert. Nach dem Induktionsgesetz muß auch bei einer Magnetflußänderung in dem Leiter, der den Magnetfluß hervorruft, eine Urspannung induziert werden. Die Induktion einer Urspannung im gleichen Leiter tritt - wie bei allen übrigen Induktionsvorgängen - beim Ein- oder Ausschalten und beim Verstärken bzw. Schwächen des Stromes auf. Dieser Vorgang wird allgemein als Selbstinduktion bezeichnet.

Die Richtung der Selbstinduktionsurspannung ist nach der Lenzschen Regel beim Einschalten und Verstärken dem Strom entgegengerichtet. Diese Gegenspannung verhindert beim Einschalten das plötzliche Ansteigen des Stromes. Beim Ausschalten oder Abschwächen des Stromes erzeugt das umgebende Magnetfeld eine dem fließenden Strom gleichgerichtete Urspannung, die den abklingenden Strom verstärkt.

Die Selbstinduktion verleiht der Spule, wie Sie aus dieser Darstellung gesehen haben, den Charakter eines Energiespeichers, ähnlich der trägen Masse in der Mechanik.

Die Größe der Selbstinduktion kann man durch das Induktionsgesetz bestimmen. In einer Spule von w Windungen wird folgende Selbstinduktion E induziert:

$$E = w \cdot - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Diese Gleichung kann man umformen:

Das Ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises lautet (Lbf. 3, Gleichung (13))

$$R_m = \frac{V}{\Phi} \quad \text{oder bei } V = \mathcal{E} = I \cdot w$$

$$R_m = \frac{I \cdot w}{\Phi}$$

also
$$\Phi = \frac{I \cdot w}{R_m}$$

Den Differenzenquotienten $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ kann man auch schreiben:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{1}{R_m} \cdot w \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

weil die Änderung des magnetischen Flusses Φ allein nur durch die Änderung der Stromstärke möglich ist.

Setzt man die Umformung des Differenzenquotienten in das Induktionsgesetz ein:

$$E = w \cdot - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

dann erhält man

$$\begin{aligned} E &= - \frac{1}{R_m} \cdot w^2 \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \\ &= - \frac{w^2}{R_m} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \end{aligned}$$

Allgemein heißt der Quotient

$$\frac{w^2}{R_m}$$

Selbstinduktionskoeffizient, oder man bezeichnet ihn als Selbstinduktivität mit dem Formelzeichen L.

$$\text{Selbstinduktivität} \quad L = \frac{w^2}{R_m} = w^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot A \cdot \frac{1}{l} \quad (4)$$

Wenn man diesen Koeffizienten in die Ausgangsgleichung

$$E = - \frac{w^2}{R_m} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

wieder einsetzt, erhält man für die Selbstinduktionsurspannung E_s

$$E_s = - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (4a)$$

Die Einheit der Selbstinduktion läßt sich durch Einsetzen der Einheiten der einzelnen Größen in die Gleichung (4) ermitteln. Die Windungszahl w haben Sie bereits im Lbf. 3 als

eine dimensionslose Größe kennengelernt. Die Einheit des magnetischen Widerstands (Lbf. 3, 1.7.2.6.) ist

$$\frac{A}{Vs} \quad \text{oder} \quad \frac{A}{Wb} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{H}$$

Beim Einführen der Einheit $\frac{1}{H}$ (H = Henry) haben wir Sie darauf aufmerksam gemacht, daß die Einheit Henry für den Magnetismus eine große Bedeutung hat. Die Einheit der Selbstinduktivität L muß nach dieser Entwicklung der Kehrwert der Einheit des magnetischen Widerstands sein, also

$$\text{Einheit der Selbstinduktivität } [L] = \frac{Vs}{A} = \frac{Wb}{A} = H$$

Am gebräuchlichsten ist als Einheit der Selbstinduktion L das Henry (H).

Das Henry ist die Induktivität einer geschlossenen Windung, die von einem elektrischen Strom der Stärke 1 A durchflossen wird und im Vakuum den Magnetfluß von 1 Vs bzw. 1 Wb hervorruft.

Wie bei allen anderen Einheiten kann man Vielfache von der Einheit der Selbstinduktion bilden. Gebräuchlich ist für die Einheit

$$1 \text{ mH} = 1 \text{ Millihenry} = 10^{-3} \text{ Henry}$$

L e h r b e i s p i e l 4

Berechnen Sie die Selbstinduktivität einer Ringspule mit Holzkern, die einen mittleren Durchmesser d von 11 cm, einen Flußquerschnitt von 3 cm^2 und 300 Windungen hat!

Gegeben: Ringspule d = 11 cm

Gesucht: L = ?

Flußquerschnitt A = 3 cm^2

w = 300

$\mu_r = 1$ (von Holz)

L ö s u n g :

$$L = w^2 \cdot \mu_0 \cdot A \cdot \frac{1}{l}$$

$$l = d \cdot \pi$$

$$L = w^2 \cdot \mu_0 \cdot A \cdot \frac{1}{d \cdot \pi}$$

$$= 300^2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot 3 \text{ cm}^2 \cdot \frac{1}{11 \text{ cm} \cdot 3,14}$$

$$= 9 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{H}}{\text{cm}} \cdot \frac{3 \text{ cm}^2}{34,5 \text{ cm}}$$

$$L = 0,983 \cdot 10^{-4} \text{ H} = 0,0983 \text{ m H}$$

=====

1.7.5.5. Wirbelströme

Bisher haben wir die Wirkung der Induktion nur in Drähten betrachtet. Denken Sie aber an eine Ringspule mit einem Eisenkern! Dieser Eisenkern stellt auch einen geschlossenen Leiter dar. Fließt in der Ringspule ein Strom, dann wird auch im Eisenkern eine Urspannung induziert und es fließt ein Induktionsstrom. Diese in ausgedehnten Metallmassen entstehenden Induktionsströme bezeichnet man als Wirbelströme, weil sie im Inneren der Metallmassen ohne bestimmte Bahnen kreisen. Die Wirkung der Wirbelströme kann man am sogenannten Waltenhofenschen Pendel erkennen (Bild 17).

Zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten pendelt eine Kupferscheibe. Wird der Elektromagnet erregt, entsteht ein Magnetfluß Φ , in der Kupferscheibe wird eine Urspannung induziert; es fließen Induktionsströme, die man in diesem Fall als Wirbelströme bezeichnet.

Nach der Lenzschen Regel ist die Kraft, die durch das Magnetfeld des Induktionsstromes erzeugt wird, immer der Kraft entgegengerichtet, die den Induktionsstrom erzeugt. Das Pendel muß daher sofort nach der Erregung des Elektromagneten zum Stillstand kommen.

Setzt man statt des massiven Kupferpendels ein geschlitztes Pendel - wie im Bild 18b dargestellt - ein, dann bewegt sich dieses Pendel trotz des Magnetflusses Φ ruhig weiter. Im Bild 18a ist Ihnen schematisch der Fluß der Wirbelströme in einem vollen Pendel gezeigt. Eine Abbremsung tritt auch bei dem Pendel des Bildes 18b ein, weil ebenfalls Wirbelströme vorhanden sind. Sie ist jedoch sehr gering, weil ein Stromfluß nicht durch das gesamte Pendel, sondern nur in den durch die Luftspalte begrenzten Bezirke möglich ist. Die Wirbelströme der einzelnen Bezirke im Bild 18b sind im Verhältnis zum Stromfluß im Bild 18a sehr klein.

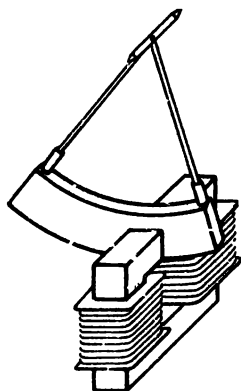


Bild 17: Waltenhofensches Pendel

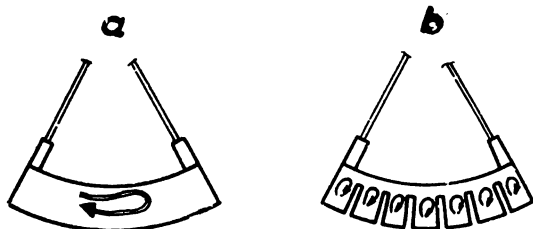


Bild 18

a) Schematische Darstellung der Wirbelströme im Waltenhofenschen Pendel

b) Geschlitztes Pendel zum Waltenhofenschen Pendelversuch zum Verringern der Wirbelströme

Die Erkenntnisse aus diesem Versuch hat man auch bei der Konstruktion von Weicheisenkernen angewendet. Die Kerne von Elektromagneten, Generatoren, Motoren und Transformatoren

stellt man daher nicht aus einem massiven Weicheisenkern her, sondern "lamelliert" sie aus Blechen, die untereinander entweder durch Papier oder durch einen Lackanstrich isoliert sind. Durch die Aufteilung des Weicheisenkerns in einzelne untereinander isolierte Bleche kann man die Wirbelströme auf ein Minimum reduzieren. Gleichzeitig mit dem Auftreten von Wirbelströmen ist eine Erwärmung des Kerns und damit der gesamten elektrischen Maschine nach dem Jouleschen Gesetz verbunden, die einmal sehr schädlich für die Isolierung der Spulen ist und zum anderen den Wirkungsgrad der Maschine beeinträchtigt. Ein erheblicher Teil der aufgewendeten elektrischen Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.

Die Erscheinung der bremsenden Eigenschaft der Wirbelströme wendet man bei der Wirbelstromdämpfung von elektrischen Meßgeräten, bei Wechselstromzählern und vor allem bei der Wirbelstrombremse der Straßenbahn bewußt an. (Bei Wechselstromzählern dreht sich eine Aluminiumscheibe zwischen den Polen eines Dauermagneten, wodurch die Rotation gebremst und damit gleichförmig wird.)

1.7.5.6. Technische Anwendungen der elektromagnetischen Induktion

In Anlehnung an die beschriebenen Versuche wurde der Funkeninduktor (Bild 19a) entwickelt. Er enthält zwei Spulen. Die primäre Spule, die einen lamellierten Eisenkern umschließt, hat nur wenige Windungen; die sekundäre Spule dagegen besteht aus vielen gegeneinander sehr sorgfältig isolierten Windungen, deren Enden zu den Elektroden E führen. In dem Primärstromkreis ist ein Unterbrecher U (Wagnersche Hammer) eingebaut, ähnlich der elektrischen Klingel (Lbf. 3, 1.7.3.2.). Wird an die Primärspule eine Spannung gelegt, dann fließt ein Strom I, es baut sich ein Magnetfeld auf, und damit verändert sich der Magnetfluß Φ , der einmal eine Induktion in der Sekundärspule und zum anderen ein Anziehen des Unterbrechers U bewirkt. Der Stromfluß in der Primärspule wird unterbrochen; der Unterbrecher U fällt ab, der Magnetfluß Φ ändert sich.

Es wird in der Sekundärspule wieder eine Spannung induziert, aber von entgegengesetzter Richtung. Nun wiederholt sich dieser Vorgang. In der Sekundärspule wird eine Spannung induziert, deren Richtung laufend wechselt; man bezeichnet sie deshalb als Wechselspannung.

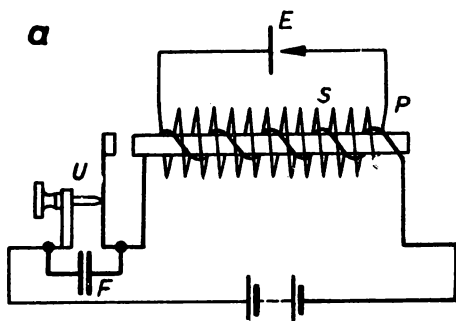


Bild 19a: Funkeninduktor

Die beim Schließen und Öffnen des Unterbrechers U induzierte Spannung ist nicht gleich. Beim Schließen verhindert die Selbstinduktion ein rasches Ansteigen der Stromstärke in der Primärspule, beim Öffnen entsteht wiederum wegen der Selbstinduktion am Unterbrecher ein Öffnungsfunken und verzögert das schnelle Herabsinken der primären Stromstärke auf Null. Um diesen Öffnungsfunken zu verkleinern, schaltet man dem Unterbrecher einen Kondensator F parallel (Funkenlöschkondensator). Dadurch sinkt beim Öffnen die Stromstärke in der Primärspule rasch auf Null, wodurch in der Sekundärspule eine hohe Spannung induziert wird. (Bild 19b)

Der Funkeninduktor hat auch heute noch ein großes Anwendungsgebiet in der Zündanlage der Kraftfahrzeuge. Die Zündspule und der Unterbrecher sind nichts anderes als ein Funkeninduktor, bei dem man die hohe Induktionsspannung beim Öffnen des Unterbrechers zur Bildung des Zündfunkens an der Zündkerze ausnützt.

Das gleiche Prinzip gilt auch für den Transformator (Bild 20).

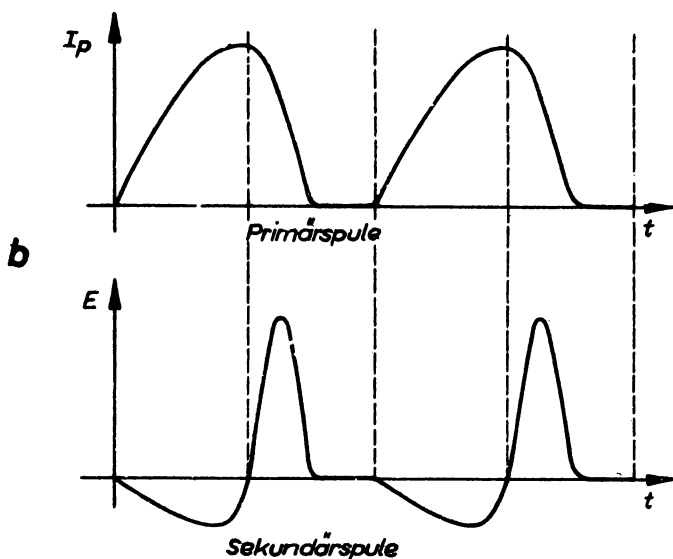
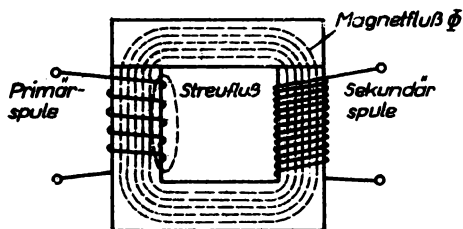


Bild 19b: Strom- und Spannungskurven eines Funkeninduktors

Eine Primär- und eine Sekundärspule sitzen auf einem geschlossenen Eisenkern. Bedingung ist für den Transformator, daß er mit einem durch einen Unterbrecher zerhackten Gleichstrom oder - wie es allgemein üblich ist - mit Wechselstrom (einen seine Richtung dauernd wechselnden Strom) betrieben wird. Der zerhackte Gleichstrom oder der Wechselstrom wird der Primärspule zugeführt.



Durch das dauernde Ändern des Stromflusses ändert sich auch der Magnetfluß Φ , was wiederum Voraussetzung ist für die Induktion einer Urspannung und das Fließen eines Induktionsstromes in der Sekundärspule. Der

Bild 20: Schema eines Transformators

Transformator ist eines der wichtigsten Schaltungselemente der Wechselstromtechnik. Sie werden in dem folgenden Lehrbrief davon noch mehr lesen.

Eine weitere wichtige Anwendung der elektromagnetischen Induktion findet man im Induktionsofen (Bild 21). (In ihm findet man das Transformatorprinzip.)

Die eine Seite des Eisenkerns trägt die Primärwicklung wie beim Transformator. Als Sekundärwicklung um den zweiten Schenkel dient das Schmelzgut, das sich in einer isolierten und wärmebeständigen Rinne befindet. Es bildet so eine Windung um den Schenkel des Transformators. In ihm werden also Induktionsströme erzeugt, die nach dem Jouleschen Gesetz Wärme erzeugen und das Schmelzgut schmelzen.

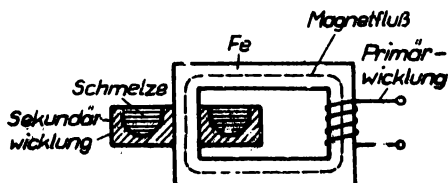


Bild 21: Schema eines Induktionsofens

Ein Anwendungsbeispiel aus der Schwachstromtechnik ist das Magnetofon. An dem Hörkopf des Magnetofons läuft ein sogenanntes Magnetband vorüber. Das Magnetband ist ein ca. 50 μm starker Film mit einer aufgetragenen ferromagnetischen Schicht. Beim Aufnehmen wird dieses Magnetband verschieden stark magnetisiert. Will man das Band "abspielen", dann läuft das magnetisierte Band an dem Schlitz eines Weicheisenkerns vorüber. Dieser Weicheisenkern überträgt den Magnetfluß des Magnetbandes und induziert in einer Spule eine Urspannung. Der entstandene Induktionsstrom wird einem Verstärker zugeführt. Das Magnetofonverfahren ist das modernste Speicherungsverfahren für alle nur denkbaren Zwecke. Man verwendet es nicht nur zur Speicherung von Sprache und Musik, sondern in der letzten Zeit ist es auch gelungen, Fernsehsendungen auf Magnetband zu speichern. Auch bei den elektronischen Rechenautomaten sind Magnetspeicher wichtige Bauelemente.

Zusammenfassung

=====

Bewegt man einen Leiter im Magnetfeld, dann wird in dem Leiter eine Urspannung induziert; es fließt ein Induktionsstrom. Diesen Vorgang bezeichnet man als elektromagnetische Induktion.

Die Feldlinien-, Bewegungs- und Stromrichtung kann man durch die "Rechte-Hand-Regel" bestimmen:

Wenn man die offene rechte Hand so in das Magnetfeld hält, daß die Feldlinien in die innere Handfläche eintreten und der Daumen die Bewegungsrichtung anzeigt, dann geben die ausgestreckten Finger die Richtung der induzierten Urspannung an.

Auch bei der elektromagnetischen Induktion gilt der Energiesatz. Die bewegende mechanische Arbeit muß also größer sein als die entstandene elektrische Arbeit, weil der Wirkungsgrad bei einer Energieumwandlung kleiner als 1 ist.

Für die Bestimmung der Richtung der Kräfte bei der elektromagnetischen Induktion gilt die Lenzsche Regel:

Der Induktionsstrom ist immer so gerichtet, daß er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen versucht.

Die induzierte Urspannung und damit auch den fließenden Induktionsstrom kann man erhöhen, wenn man statt einer Leiterschleife eine Spule verwendet. Auch der permanente Magnet läßt sich durch einen Elektromagneten ersetzen. Bei diesen Versuchen erkennt man, daß zur Erzeugung nicht unbedingt das Bewegen eines Leiters in einem Magnetfeld wichtig ist, sondern das Ändern des von der Spule umfaßten Magnetflusses Φ .

In diesem Fall kann man die Richtung des Induktionsstromes bei Spulen nach der Uhrzeigerregel bestimmen:

Blicken Sie in Richtung der Feldlinien, dann fließt der Induktionsstrom entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn, wenn sich der Magnetfluß und damit die Feldlinienzahl vergrößert; verringert sich der Magnetfluß, dann fließt der Induktionsstrom im Uhrzeigersinn.

Das Induktionsgesetz lautet:

In einem geschlossenen Leiterkreis wird eine Urspannung induziert, solange sich der den Leiter umgebende Magnetfluß ändert.

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Erzeugt man den Magnetfluß Φ nicht durch einen Dauermagneten, sondern durch eine stromdurchflossene Spule, dann wird in der gleichen Spule beim Ein- oder Ausschalten und beim Verstärken bzw. Schwächen des Stromes eine Urspannung induziert, die als Selbstinduktionsurspannung bezeichnet wird.

Als Selbstinduktionskoeffizient oder Selbstinduktivität gilt:

$$L = \frac{w^2}{R_m} = w^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot A \cdot \frac{1}{l}$$

Die Einheit der Selbstinduktivität ist $\frac{Vs}{A}$ bzw. $\frac{Wb}{A}$ bzw. H.

Wirbelströme nennt man die Induktionsströme, die in ausgedehnten Metallmassen, also nicht in Spulen, bei elektrischen Maschinen, Transformatoren usw. fließen.

Deshalb werden die Kerne von Transformatoren und elektrischen Maschinen nicht aus massivem Weicheisen, sondern aus gegenseitig isolierten Blechen lamelliert.

Die bremsende Eigenschaft der Wirbelströme wendet man bei der Dämpfung von elektrischen Meßgeräten, bei Wechselstromzählern und bei der Wirbelstrombremse der Straßenbahn an.

Die wichtigste technische Anwendung der elektromagnetischen Induktion ist der Transformator. Weitere Anwendungen finden Sie im Funkeninduktor, im Induktionsofen und beim Magnettonverfahren.

Wiederholungsfragen

=====

4. Welche Bedingung muß erfüllt sein, damit eine Urspannung in einem Leiter induziert werden kann?
5. Wie können in dem Kern eines Transformators Wirbelströme vermieden werden?

6. Wann wird in einer vom Strom durchflossenen Spule eine Selbstinduktionsurspannung induziert und welche Richtung hat sie?

Ü b u n g

2. In der Sekundärwicklung einer Spule von 40 cm Länge und 8 cm Durchmesser soll beim Ausschalten eine Urspannung von $E = 6000 \text{ V}$ induziert werden. Die Primärspule hat 50 Windungen, und es fließen 2,5 A. Beim Ausschalten wird der Strom I innerhalb von $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ gleich Null. Wieviel Windungen muß die Sekundärspule haben?

Antworten auf die Wiederholungsfragen

1. Die Drehrichtung einer stromdurchflossenen Spule kann man verändern, indem man entweder die Stromrichtung oder das Magnetfeld umkehrt. Beachten Sie dabei, daß man nur die Stromrichtung oder das Magnetfeld umkehrt: wenn man beides tut, dann bleibt die alte Drehrichtung erhalten.
2. Die Sammelschienen im Kraftwerk stellen zwei parallele Leiter mit entgegengesetztem Stromfluß dar. Bei Kurzschlußstrom entstehen zwei sehr starke magnetische Felder um die Sammelschienen und damit auch eine Kraftwirkung, die so stark ist, daß sich die Sammelschienen mindestens nach außen durchbiegen und vielfach auch aus der Befestigung herausgerissen werden.
3. Wie Sie bereits aus der Antwort zur ersten Frage gesehen haben, tritt eine Veränderung der Drehrichtung des Motors nur dann ein, wenn entweder das Magnetfeld oder der Ankerstrom umgekehrt werden.
4. In einem geschlossenen Leiterkreis wird nur dann eine Urspannung induziert, solange sich der den Leiter umgebende Magnetfluß ändert (Induktionsgesetz).

Das Ändern des Magnetflusses kann einmal erreicht werden durch Bewegung des Leiters oder des Elektromagneten und zum anderen durch Ändern des Magnetflusses eines Elektromagneten, indem man den Erregerstrom I erhöht oder verringert.

5. Wirbelströme im Kern eines Transformators und jeder anderen elektrischen Maschine können bis auf ein Minimum verringert werden, wenn man statt eines massiven Weich-eisenkernes den Kern mit Kernblechen lamelliert, die gegeneinander durch Papier oder Lack isoliert sind. Durch diese Anordnung können die Wirbelströme nicht in dem ganzen Kern, sondern nur in den einzelnen Blechlagen auftreten, wo ihre Wirkung aber sehr gering ist.
6. Um jede stromdurchflossene Spule bildet sich ein Magnetfeld. Beim Ein- oder Ausschalten bzw. Ändern der Stromrichtung ändert sich auch der Magnetfluß. Durch das Ändern des Magnetflusses wird aber in einem Leiter eine Urspannung induziert, und in einem geschlossenen Leiterkreis fließt ein Induktionsstrom. In dem Erregerstromkreis für das Magnetfeld wird also auch eine Urspannung induziert, die nach der Lenzschen Regel beim Einschalten dem fließenden Strom entgegen- und beim Ausschalten aber gleichgerichtet ist.

Antworten und Lösungen

1. $M = 11,96 \text{ A}$

2.a) $\Phi_1 = 3,94 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$

b) $\Phi_2 = 0$

c) $w = 2538$

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

KÜHNE

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHT- ELEKTROTECHNIKER

5

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAVS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-05/63

1963



ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 5

von

Dipl.-Gwl. Günther Kühne

1. Auflage

Herausgeber:

Zentralstelle für Fachschulausbildung

Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie
Dresden

Inhaltsverzeichnis

	Seite
3. Wechselstrom	4
3.1. Allgemeines	4
3.2. Wechselströme und -spannungen	6
3.2.1. Entstehung des Wechselstromes	6
3.2.2. Effektiv- und Mittelwert	12
3.2.3. Technische Erzeugung von Wechselstrom	13
3.3. Addition von sinusförmigen Wechsel- größen gleicher Frequenz	16
3.4. Wechselstromwiderstände	20
3.5. Leistung	30
3.6. Mehrphasen-Wechselstrom	36
3.6.1. Erzeugung des Drehstroms	36
3.6.2. Verkettungsschaltungen	38
3.6.3. Leistung	43
3.7. Drehfeld und Drehstrommotoren	47
3.7.1. Entstehung des Drehfeldes	47
3.7.2. Synchronmotoren	48
3.7.3. Asynchronmotoren	49
3.7.4. Anlassen von Kurzschlußmotoren	51
3.8. Ein- und Mehrphasentransformator	55
3.9. Schutzmaßnahmen in elektr. Nieder- spannungsanlagen	60
4. Erste Hilfe bei Unfällen durch den elektrischen Strom	72
Antworten und Lösungen	77
Formelsammlung	80

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 123 /63

Best-Nr. 5030-05/63

V o r w o r t

Dem vorliegenden Lehrbrief liegt als Manuskript der Lehrbrief 3 aus der Reihe "Elektrotechnik" der Ingenieurschule für Eisenbahnwesen Dresden, zugrunde. Daraus ergibt sich, daß dieser Lehrbrief in der drucktechnischen und inhaltlichen Gestaltung von den übrigen Lehrbriefen der Reihe "Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker" etwas abweicht. Diese Übergangslösung ist jedoch notwendig, bis ein geeignetes Lehrbuch für das gesamte Stoffgebiet vorliegt, was in absehbarer Zeit der Fall sein wird.

In diesem Lehrbrief wird nicht nur eine Einführung in die Lehre der Wechselstromtechnik gegeben, sondern es werden auch Motoren und Umspanner kurz behandelt. Die letztgenannten Stoffabschnitte brauchen Sie nicht zu berücksichtigen, da Sie ja elektrische Maschinen und Antriebe in den Lehrbriefen 6 bis 8 studieren werden. Das trifft auch zu auf die Schutzmaßnahmen in elektrischen Niederspannungsanlagen.

3. Wechselstrom

3.1. Allgemeines

In den bisherigen Lehrbriefen wurden die Gesetze und Wirkungen jener elektrischen Ströme behandelt, die man allgemein als Gleichstrom bezeichnet, da sie sowohl in einer bestimmten Richtung fließen als auch ihre Stärke nicht ändern. Derartige konstante Gleichströme erzeugen auch konstante Wirkungen. Sie erzeugen z. B. in gleichen Zeiten gleiche Wärmemengen, konstante Magnetfelder usw. Konstante elektrische Spannungen erzeugen konstante elektrische Felder und ebenso konstante elektrische Ladungen, z. B. in Kondensatoren.

Allerdings besteht meist dieser stationäre Zustand nicht dauernd. Es kann sich sowohl der Strom als auch die Spannung durch Belastungsänderungen z. B. von Motoren in gewissen Zeiten ändern. Derartige Änderungen erfolgen aber meist langsam und stetig und haben daher keinen wesentlichen Einfluß auf die Beziehungen zwischen der Stromstärke und der Spannung, die durch das Ohmsche Gesetz gegeben ist, oder auf die Ströme in Stromverzweigungen, die durch die Kirchhoffschen Gesetze berechnet werden können. Bei langsamer Änderung der Stromstärke und der Spannung können auch die momentan wirkenden Änderungen so langsam vor sich gehen, daß die Zeiger der Meßinstrumente diesen Änderungen folgen können, ohne ins Pendeln zu geraten.

Ein Gleichstrom ist ein Strom, dessen Augenblickswerte zeitlich konstant sind.

Gleichstrom: Strom gleichbleibender
Stärke und Richtung

Im Gegensatz dazu gibt es Stromarten, deren Augenblickswerte sich in Abhängigkeit von der Zeit, im Betrag und in der Richtung ändern. Der vorliegende Lehrbrief soll Sie mit Stromkreisen vertraut machen, die mit der am häufigsten auftretenden Stromart des Wechselstromes, dem Sinusstrom, gespeist werden.

Wechselstrom: Strom periodisch wechselnder
Stärke und Richtung

Die Deutsche Industrie Norm DIN 40015 legt die Einteilung der Wechselströme nach der Frequenz fest. Damit soll eine möglichst einheitliche Bezeichnung für die Starkstrom- und Nachrichtentechnik erreicht werden. In **Bild 1** finden Sie die Grundnormen der Frequenz- und Wellenbereiche.

Für die Energieversorgung verwendet man Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz (dagegen $16\frac{2}{3}$ Hz Bahnstrom). Man nennt ihn auch technischen Wechselstrom. Der große Vorteil dieser Stromart liegt in der einfachen Änderung der Höhe seiner Spannung mit Hilfe von Transformatoren. Durch hochgespannten Wechselstrom ist der Transport elektrischer Energie über große Entfernungen überhaupt erst möglich geworden. Das Landes-Verbundnetz der DDR arbeitet mit einer Spannung von 110 kV. Diesem Netz ist ein im Entstehen begriffenes 220-kV-Netz übergeordnet. Für die neuen großen Kraftwerksleistungen reicht selbst diese Spannung nicht mehr aus, so daß eine 380-kV-Leitung im Bau ist. Mit der Wahl dieser großen Übertragungsspannung kann auch an den Bau einer internationalen Energiesammelschiene gedacht werden. Eine derartige

Leitung hätte besonders in der Ost-West-Richtung (unterschiedliche Tageszeiten) für Eurasien große energiewirtschaftliche Vorteile.

Bei der Anwendung des Wechselstromes in der Starkstromtechnik haben wir zu unterscheiden zwischen **Einphasenwechselstrom** und **Drehstrom**. Einphasenwechselstrom findet Anwendung in der gesamten Hausinstallation (Spannung bis 220 V), bei Bahnen (Spannungen bis 25 kV), in der Schweißtechnik (Spannungen bis 100 V) und für wenige Sonderfälle in der Industrie. Die durch das Landesenergienetz verbundenen Kraftwerke sind Drehstromkraftwerke. Bei Bedarf von Einphasenwechselstrom wird das Drehstromnetz zwischen zwei Leitern oder zwischen einem spannungsführenden Leiter und dem Nulleiter (Hausinstallation) angezapft. Die direkte Erzeugung von Einphasenwechselstrom erstreckt sich auf Sonderfälle, vor allem aber auf die Bahnstromversorgung für 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnen.

Die installierte Kraftwerksleistung des 50-Hz-Landesnetzes beträgt in unserer DDR gegenwärtig ca. 6000 MW und ist ständig im Steigen begriffen. Die Kraftwerksleistung für den Einphasenbahnbetrieb beträgt dagegen nur ca. 60 MW. Der Wunsch, die Bahnen aus dem Landesnetz mit Einphasenwechselstrom 50 Hz zu speisen, ist fast so alt wie die elektrische Zugförderung selbst. Das Ringen um die technische Lösung dieses Problems hat zu einer Anzahl von 50 Hz Lokomotivsystemen geführt. Eine nennenswerte Verbreitung fand das 50-Hz-System jedoch erst nach Einführung von betriebssicheren Lokomotiv-Gleichrichtern. Gleichrichterlokomotiven besitzen wegen der Verwendung der **Gleichstromfahrmotoren** außerordentlich günstige betriebliche Eigenschaften. Als Gleichrichter finden neuerdings Kristallgleichrichter (vor allem Silizium) Verwendung. Drehstrom kommt für eine moderne Bahnelektrifizierung nicht in Frage. Die erforderliche doppelpolige Fahrleitung belastet die Wirtschaftlichkeit und führt besonders in Bahnhofsanlagen (Drehstromstrecken in Oberitalien) zu betrieblichen Schwierigkeiten. Die Spannungen sind genormt. Dadurch können die Netze einheitlich gestaltet und elektrische Apparate und Geräte ausgetauscht und billiger hergestellt werden.

Es gelten als Kleinspannung: Spannungen bis 42 V (65 V),

Niederspannung: Spannungen bis 250 V gegen Erde,

Hochspannung: Spannungen über 250 V gegen Erde.

3.2. Wechselströme und -spannungen

3.2.1. Entstehung des Wechselstroms. Die in der Technik am häufigsten auftretende Form von Wechselgrößen ist die Sinusform. Diese Wechselgröße besitzt den Vorteil, daß bei Transformation ihre Form unverändert bleibt. Eine sinusförmige Spannung bewirkt beim Durchgang durch Widerstände (ohmsche Widerstände) auch einen sinusförmigen, phasengleichen Strom. Darüber werden Sie später Genaueres erfahren.

Die Gleichung einer sinusförmigen Spannung lautet:

$$u = U_{\max} \cdot \sin \alpha$$

Man bezeichnet u als Momentanwert und U_{\max} auch U_m als Maximal- oder Scheitelwert, wobei der Winkel α durch die Drehung einer Leiterschleife im Magnetfeld zu erklären ist.

In Bild 2 ist eine Leiterschleife (Spule) aus Kupferdraht zwischen den Polen eines Magneten drehbar gelagert. Wird die Leiterschleife zwischen den Magnetpolen gedreht, dann schneidet sie die magnetischen Kraftlinien des Feldes. Infolgedessen wird in den Spulenseiten eine Spannung induziert. Diese EMK hat in Spulenseite a die umgekehrte Richtung wie in Spulenseite b (Rechte-Hand-Regel — Generatorregel, siehe Lehrbrief 2). Da die beiden Spulenseiten in Reihe geschaltet sind, entsteht zwischen den Enden der Spule eine Spannung, die doppelt so hoch ist wie die in einer Spulenseite.

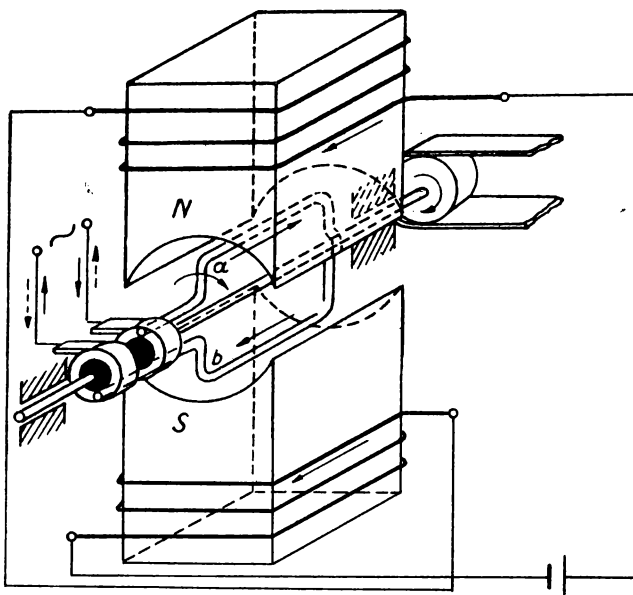


Bild 2 Grundsätzlicher Aufbau eines fremderregten Wechselstromgenerators (Modelldarstellung)

Die Erzeugung der EMK ergibt sich aus Bild 3. In Bild 3 A, ist angenommen, daß bei der Drehung der Spule die Spulenseiten in die Mitte zwischen die Polspitzen gekommen sind. In dieser Stellung schneiden die Spulenseiten keine Kraftlinien (Neutrale Zone). In Bild 3 B ist die Spulenseite a unter den Nordpol und die Spulenseite b unter den Südpol gekommen. Beide Spulenseiten schneiden jetzt Kraftlinien. Der erzeugte Induktionsstrom ist schwach, weil in dieser Stellung die Spulenseiten verhältnismäßig wenig Kraftlinien schneiden. Die Stromrichtung in den Spulenseiten ergibt sich nach der Rechten-Hand-Regel.

In **Bild 3 C** sind die Seiten a und b unter die Polmitten gekommen. Hier schneiden die Spulenseiten die meisten Kraftlinien. Der erzeugte Induktionsstrom hat infolgedessen seine größte Stärke erreicht. Seine Richtung ist die gleiche wie in **Bild 3 B**.

In **Bild 3 D** schneiden die Spulenseiten weniger Kraftlinien als in **Stellung 3 C**. Die Stärke des Stromes sinkt. Seine Richtung ist unverändert.

In **Bild 3 E** sind die Spulenseiten wieder in die Mitte zwischen die Polspitzen gekommen (**Neutrale Zone**). Jetzt werden keine Kraftlinien geschnitten. Die Stromstärke ist auf Null gesunken. Zu beachten ist, daß beide Spulenseiten gegenüber der Stellung A₁ ihre Lage vertauscht haben. Spulenseite a ist in die Ausgangsstellung der Spulenseite b gekommen. Mit Spulenseite b ist es umgekehrt.

In **Bild 3 F** bewegt sich Spulenseite a unter dem Südpol von rechts nach links und Spulenseite b unter dem Nordpol von links nach rechts. Beide Spulenseiten schneiden wieder Kraftlinien. Infolgedessen wird Spannung induziert. Die Stromrichtung in den Spulenseiten ist aber umgekehrt wie vorher. In der Stellung **Bild 3 E** hat bei den beiden Spulenseiten demnach ein Wechsel sowohl in der Bewegungsrichtung als auch in der Stromrichtung stattgefunden. In **Bild 3 G** sind beide Spulenseiten wieder unter die Polmitten gekommen. Weil in dieser Stellung die meisten Kraftlinien geschnitten werden, wird auch der erzeugte Induktionsstrom am stärksten. Der Strom hat jetzt zum zweiten Mal seine größte Stärke erreicht. Seine Richtung ist jedoch umgekehrt wie das erste Mal.

In **Bild 3 H** schneiden die Spulenseiten wieder weniger Kraftlinien. Die Stärke des Stromes ist gesunken.

In **Bild 3 A₂** sind die Spulenseiten in ihre Ausgangsstellung zurückgekehrt. Der Induktionsstrom ist wieder auf Null gesunken. Er wechselt jetzt seine Richtung

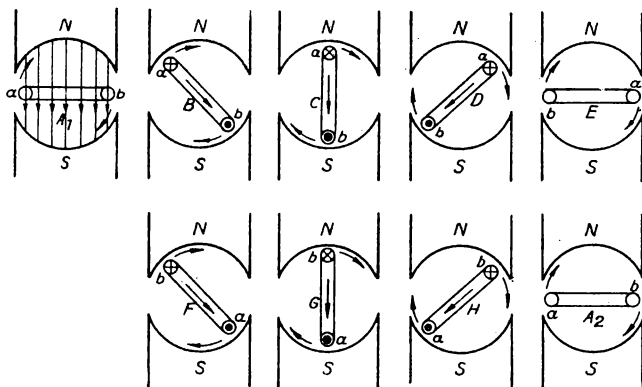


Bild 3 Richtung und Stärke des Induktionsstromes einer bewegten Leiterschleife im Magnetfeld

zum zweiten Mal. Verbindet man jedes Spulenende mit einem Ring aus Metall (Schleifring) und werden die beiden Ringe gegeneinander und gegen die Welle gut isoliert, dann kann der in der Spule induzierte Strom mittels Bürsten in den äußeren Stromkreis geleitet werden (**Bild 2**).

Aus Vorstehendem erkennt man, daß sich die Stärke eines solchen Induktionsstromes dauernd ändert und daß seine Richtung dauernd wechselt. In diesem Zusammenhang soll nochmals auf das Induktionsgesetz (Fundamentalgesetz) verwiesen werden. Im Gesetz ist der Vorgang der Spannungserzeugung in eine allgemein gültige mathematische Fassung gebracht.

$$\text{Induktionsgesetz } e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Auf Grund der Richtungsgesetze ergibt sich, daß die so erzeugte Spannung dem das Magnetfeld erzeugenden Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Deshalb ist das Minuszeichen (Richtungszeichen) in die Formel eingefügt. Dies wird besonders deutlich, wenn man **Bild 2** betrachtet.

Der Verlauf dieses Stromes wird durch eine Wellenlinie dargestellt. Diese Wellenlinie verläuft nach einem Gesetz, dem Sinusgesetz. Infolgedessen wird eine solche Wellenlinie auch Sinuslinie genannt.

Sehr einfach kann eine Sinuslinie von einer Kreislinie hergeleitet werden. Betrachten Sie die Projektion PQ eines rotierenden Radiuszeigers (**Bild 4**). Stellt man die Projektion des Zeigers in Abhängigkeit vom Drehwinkel α dar, so entsteht die Sinuslinie.

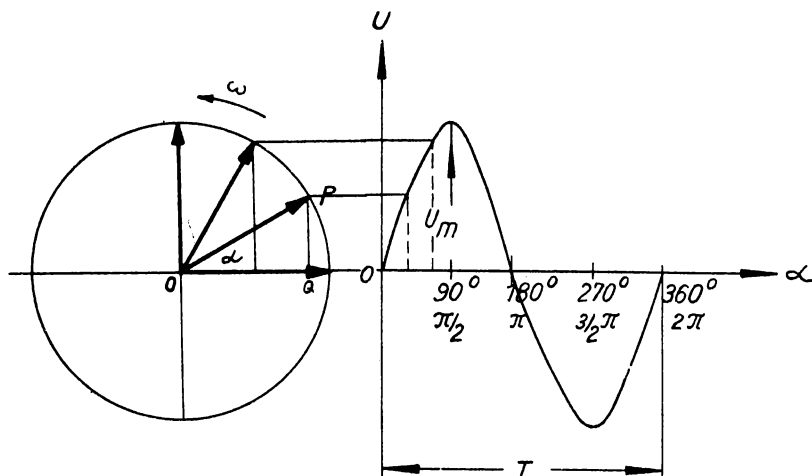


Bild 4 Projektion des rotierenden Zeigers in Abhängigkeit vom Drehwinkel

Die Sinuslinie ist auch das Symbol (Bildzeichen) für das Schaltzeichen, hingegen eine Gleichspannung durch einen waagerechten Strich gekennzeichnet wird. Man unterscheidet bei der Sinuslinie positive und negative Wechsel und meint damit den Kurvenverlauf oberhalb bzw. unterhalb der Zeitlinie (Zeitachse).

Ein zusammenhängender positiver und negativer Wechsel heißt volle Schwingung oder **Periode**. Als Schwingungsweite (Amplitude) bezeichnet man die Entfernung von der Zeitachse bis zum Höchstwert (Maximum bzw. Minimum). Die Anzahl der vollen Schwingungen je **Sekunde** nennt man Frequenz.

1 Schwingung je Sekunde = 1 Hertz¹⁾

Abgeleitete Maßeinheiten sind:

$$1 \text{ kHz} = 1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$$

Unter der Schwingungsdauer T versteht man die Zeitdauer für eine volle Schwingung. Eine Wechselspannung für 50 Hz führt mithin 50 volle Schwingungen je Sekunde aus.

Zwischen der Frequenz f und der Schwingungsdauer T eines Schwingvorganges besteht der Zusammenhang

Frequenz

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{oder} \quad T = \frac{1}{f}$$

Einheitengleichung

$$1 \text{ Hz} = 1 \cdot \frac{1}{\text{s}}$$

Schwingungen von etwa 15 Hz bis 20 kHz sind als Schall hörbar. Man bezeichnet diesen Bereich daher als Tonfrequenzbereich.

Bei einer sinusförmigen Spannung nimmt der Winkel α proportional mit der Zeit t zu.

Als Maß für die Geschwindigkeit der Drehbewegung wurde die Winkelgeschwindigkeit eingeführt. Bei einem vollen Umlauf ist die vom Zeiger im Einheitskreis bestrichene Bogenlänge 2π , dies entspricht 360° ! Hat der Wechselstrom eine bestimmte Frequenz, so ist der vom Zeiger (**Bild 4**) in 1 Sekunde bestrichene Winkel, gemessen im Bogenmaß nach der Definition gleich der Winkelgeschwindigkeit

Winkelgeschwindigkeit
(Kreisfrequenz)

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

Man bezeichnet ω in der Elektrotechnik als Kreisfrequenz. Die Maßeinheit der Kreisfrequenz ist ebenfalls

$$\frac{1}{\text{s}} = \text{s}^{-1}$$

¹⁾ Heinrich Hertz (1857—1899).

Die Kreisfrequenz entspricht physikalisch dem Begriff der Winkelgeschwindigkeit, d. h. dem elektrischen Phasenwinkel, der in einer Sekunde überstrichen wird.

Die Kreisfrequenz wird im Bogenmaß angegeben. Das Bogenmaß ist die Maßzahl der Länge des Bogens, den der Winkel α in Gradmaß gemessen als Zentriwinkel aus dem Einheitskreis mit dem Radius = 1 ausschneidet.

360° entsprechen dem Wert 2π und $57^\circ 17' 45''$ dem Werte 1.

Ein Grad entspricht $2\pi : 360 = 0,01745$.

Die Einheit des Winkels im Bogenmaß ist radiant, abgekürzt rad. 1 rad gehört zum Bogen der Länge 1 im Einheitskreis; $1 \text{ rad} = 360^\circ : 2\pi = 57^\circ 17' 45''$.

Betrachten wir nochmals die eingangs erwähnte Formel $u = U_{\max} \cdot \sin \alpha$.

Der Winkel α wird in der Zeit t überstrichen. Mathematisch formuliert $\frac{\alpha}{t}$. Da dieser Quotient äquivalent der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ ist, so kann der Momentanwert der sinusförmigen Spannung wie folgt angegeben werden:

Momentanwert der
sinusförmigen
Spannung

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$$

Beispiel:

Von einer sinusförmigen Wechselspannung sind bekannt:

$$U_{\max} = 100 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz und } t = 3 \text{ ms}$$

gesucht ist der Momentanwert u zur gegebenen Zeit t .

Lösung:

$$\begin{aligned} u &= U_m \cdot \sin \omega t \\ u &= 100 \text{ V} \cdot \sin 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ u &= 100 \text{ V} \cdot \sin 0,942 \\ u &= 81 \text{ V} \end{aligned}$$

Zu beachten ist hierbei, daß der Winkel im Bogenmaß ausgedrückt wird. Da $2\pi = 6,28$ dem Gradmaß 360° entspricht, ist die Einheit des Bogenmaßes $360^\circ : 6,28 = 57,3^\circ$.

Man erhält daher $\sin 0,942 \cdot 57,3^\circ = \sin 53,97^\circ$.

Aus der **Tabelle** (natürliche Werte der Winkelfunktionen) entnehmen Sie für $\sin 53,97^\circ$ den abgerundeten Wert 0,81. Diese Zahl mit 100 V multipliziert ergibt dann 81 Volt.

Beispiel:

Wie groß ist die Periodendauer einer Wechselgröße, deren Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$?

$$\text{Lösung:} \quad T = \frac{1}{f} \quad T = \frac{1}{50 \text{ s}^{-1}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s} \quad T = 0,02 \text{ s}$$

3.2.2. Effektiv- und Mittelwert.

Als Maß für die Höhe der Wechselspannung gibt man in der Regel nicht den Scheitelwert, sondern den Effektivwert an.

Eine Wechselspannung, die den **Effektivwert** $U = 220 \text{ V}$ besitzt, gibt an einen ohmschen Widerstand die gleiche Wärmewirkung ab wie eine Gleichspannung vom Wert $U = 220 \text{ V}$. Dies kann man leicht mit einem elektrischen Meßinstrument nachweisen (Hitzdrahtinstrument). Infolge der mechanischen Trägheit kann das Instrument den raschen Änderungen des Wechselstromes nicht folgen, so daß sich der Ausschlag des Zeigers auf einen gewissen Wert (Effektivwert = quadratischer Mittelwert) einstellt. Wird die Skala dieses Instrumentes mit Gleichstrom geeicht, so ist bei Betrieb mit Wechselstrom der angezeigte Wert gleich dem Effektivwert. Für **Gleichstrom** und den effektiven **Wechselstrom** gilt bei gleichen Instrumenten die **gleiche Skala**.

Nun wird Sie die Beziehung zwischen dem Effektivwert des sinusförmigen Wechselstromes und dem Maximalwert interessieren. Diese Beziehung wird durch den Faktor $1/\sqrt{2}$ geregelt.

Ist der Effektivwert gegeben und der Scheitelwert des Stromes gesucht, so folgt:

$$J_m = J \cdot \sqrt{2}$$

Zur Bestimmung des Maximalwertes einer sinusförmigen Wechselspannung brauchen wir in der obigen Gleichung für J nur U einzusetzen und erhalten

$$U_m = U \cdot \sqrt{2}$$

Der arithmetische (algebraische) Mittelwert einer Wechselgröße ist der zeitliche Mittelwert der Augenblickswerte während einer Periode.

Dieser Mittelwert (Faktor 0,637) ist für die **elektrolytische** Wirkung des Stromes, während einer Halbperiode, maßgebend. Er hat für die Berechnung von Wechselstromkreisen untergeordnete Bedeutung.

Beispiel:

Der Maximalwert des technischen Wechselstromes von 220 V ist zu bestimmen.

Lösung:

$$\begin{aligned} U_{\max} &= 220 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \\ U_{\max} &= 311 \text{ V} \end{aligned}$$

Zusammenfassung

Die wichtigsten Stromarten sind Gleichstrom, Wechselstrom und Mischstrom. Die in der Wechselstromtechnik am häufigsten auftretende Form ist die Sinusform.

Die Bestimmungsstücke einer sinusförmigen Spannung sind der Effektivwert und die Frequenz.

Die Momentanwerte der Spannungen bzw. Ströme werden mit kleinen lateinischen Buchstaben, die Effektivwerte und Scheitelwerte mit großen lateinischen Buchstaben geschrieben.

Der Effektivwert eines Wechselstroms und einer Wechselspannung erzeugt im zeitlichen Mittel an einem ohmschen Widerstand dieselbe Wärmeleistung wie ein Gleichstrom und eine Gleichspannung vom gleichen Zahlenwert.

Hitzdrahtinstrumente, Dreheiseninstrumente und Dynamometer besitzen für Gleichstrom und den Effektivwert des Wechselstroms die gleiche Skala.

Übungen :

1. Was versteht man unter der Stromart „Wechselstrom“?
2. Welche Werte unterscheidet man beim Wechselstrom?
3. Ein Spannungsmesser für Wechselstrom zeigt 380 V an. Mit welcher Spannung wird ein einzuschaltender Kondensator von 4 μF belastet?
4. Eine Wechselspannung (50 Hz) hat nach 0,003 s nach Beginn der Periode einen Momentanwert von 30 V. Wie groß ist ihr Höchstwert?

3.2.3. Technische Erzeugung von Wechselstrom. Die Erzeugung von Urspannungen bzw. elektrischen Energien beruht auf Energieumwandlungen. Zum Beispiel werden mechanische Schwingungen umgewandelt im Tonabnehmer, akustische Schwingungen im Mikrofon und Helligkeitsschwankungen in der Fotozelle.

Gleichstromenergie formt man z. B. in Röhren- oder Transistorgeneratoren, Selbstunterbrecherschaltungen (Zerhacker) und rotierenden Umformern um. Die Wechselspannungen, die mit den genannten Mitteln erzeugt werden, sind relativ klein. Man verwendet diese Arten der Erzeugung hauptsächlich in der Schwachstromtechnik. Die Energieerzeugung elektrischer Energie erfolgt durch Umwandlung mechanischer Energie in elektrische. Bei dieser Umformung kommt das **Induktionsgesetz** von Faraday (Maxwell) zur Anwendung.

Das Induktionsgesetz besagt, daß in einer Leiterschleife eine Urspannung entsteht, wenn sich der von dieser umfaßte magnetische Fluß zeitlich ändert (Lehrbrief 2).

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, diese Änderung zu erreichen.

Im ersten Fall ist die Flußstärke Φ konstant und die Schleife bewegt sich.

Im zweiten Fall ist die Schleife unbeweglich und die Flußstärke ändert sich (Transformatorprinzip).

Bei den Generatoren der Starkstromtechnik wird die mechanische Energie durch Drehbewegung zugeführt.

Die einfachste Anordnung zur Erzeugung der Wechselspannung ist bereits in **Bild 2** dargestellt.

Für die Erzeugung elektrischer Energie kommen heute fast ausschließlich Synchrongeneratoren in Frage. Im Gegensatz zu den Asynchronmaschinen sind die Synchronmaschinen für ihren Betrieb an eine bestimmte Drehzahl gebunden. Allgemein läßt sich sagen, die Frequenz der erzeugten Wechselspannung ist proportional der Umdrehungszahl und der Polpaarzahl.

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

f = Frequenz in Hertz

n = Umdrehungszahl pro Minute

p = Polpaarzahl

Bei einer vierpoligen Maschine ist beispielsweise die Polpaarzahl $p = 2$.

Beispiel:

Wie groß ist die Umdrehungszahl einer Maschine mit $p = 2$, wenn die Frequenz der erzeugten Spannung 50 Hz betragen soll?

$$\text{Lösung: } n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Arten von Synchrongeneratoren, und zwar Innenpolmaschinen und Außenpolmaschinen. Das Magnet-system bildet den äußeren Teil, der Anker mit der Wicklung, in der Wechselstrom erzeugt wird, den inneren Teil der Maschine. Das **Bild 5** stellt eine Synchronmaschine (Außenpoltype) mit 3 Schleifringen dar, die für die Erzeugung von **Drehstrom** erforderlich sind. Bei **Einphasenwechselstrom** sind nur 2 Schleifringe erforderlich. Der Drehstrom wird später behandelt.

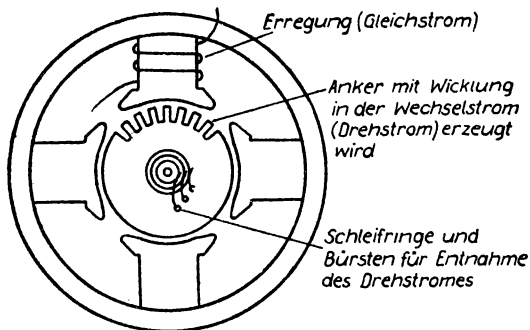


Bild 5 Synchronmaschine (Außenpoltyp)

Im Lehrbrief 2 wurde Ihnen bereits gezeigt, daß jeder Gleichstromgenerator eigentlich eine Wechselstrommaschine ist, denn jeder einzelne Leiter im Anker der Gleichstrommaschine führt einen Wechselstrom, der erst vom Stromwender (Kommutator) „gleichgerichtet“ wird. Nachteilig ist bei den Außenpolmaschinen, daß die abgegebene Leistung der Maschine dem rotierenden Teil über Schleifringe und Bürsten entnommen werden muß. Derartige Synchrongeneratoren baut man deshalb nur für Leistungen bis etwa 25 kVA¹⁾. Es können dabei Ge-

¹⁾ Kilowattampere (Einheit für Scheinleistung, Erklärung folgt später).

häuse und Polsysteme von einer normalen Gleichstrommaschine verwendet werden.

Bei der Entstehung einer induzierten Spannung (EMK) ist es gleichgültig, ob man in einem ruhenden Magnetfeld einen Leiter bewegt oder ob der Leiter stillsteht und sich das Magnetfeld dreht. Bei der Innenpolmaschine bildet das Magnetsystem den inneren umlaufenden Teil. Der Ständer (Anker) mit der Wicklung, in der Wechselstrom erzeugt wird, ist stillstehend. Die Ständerwicklung liegt in Nuten des aus lamellierten Blechen aufgebauten Ständereisens und führt zum Klemmbrett. Diese Bauart des Synchrongenerators ist heute die gebräuchlichste, weil die hochgespannten Wechselströme (10 kV bis 35 kV im Ausland) bequem der ruhenden Wicklung entnommen werden können (Bild 6).

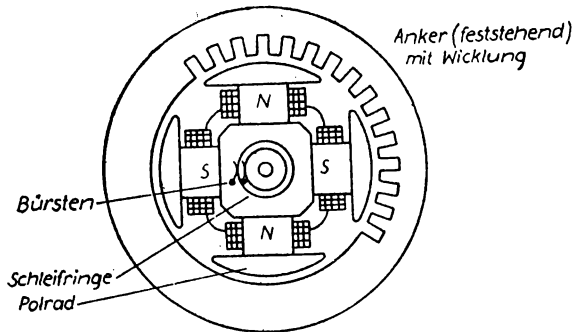


Bild 6 Synchronmaschine (Innenpoltyp)

Für die Größe der induzierten Spannung sind die Feldliniendichte B , die Geschwindigkeit der Bewegung v und die Leiterlängen maßgebend.

Induktionsgesetz für
Translationsbewegung

$$E/V = B / \frac{Vs}{cm^2} \cdot v / \frac{cm}{s} \cdot l / cm$$

Bemerkung: Ursprünglich in Gauß, wobei $1 \frac{Vs}{cm^2} = 10^8 \text{ G}$

Beispiel:

Eine Leiterschleife mit einer Länge von 50 cm bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $10 \frac{m}{s}$.

Im Luftspalt herrscht eine Induktion von $10\,000 \text{ G} = 10^4 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{cm^2}$

Lösung:

$$E = 10^{-8} \cdot 10^4 \frac{Vs}{cm^2} \cdot 10^3 \frac{cm}{s} \cdot 50 \text{ cm} \quad E = 5 \text{ V}$$

Das **Bild 7 a, b** zeigt Ihnen einen kompletten Ständer und Läufer für einen Generator. Die Löcher im Blechpaket dienen zur besseren Entlüftung.

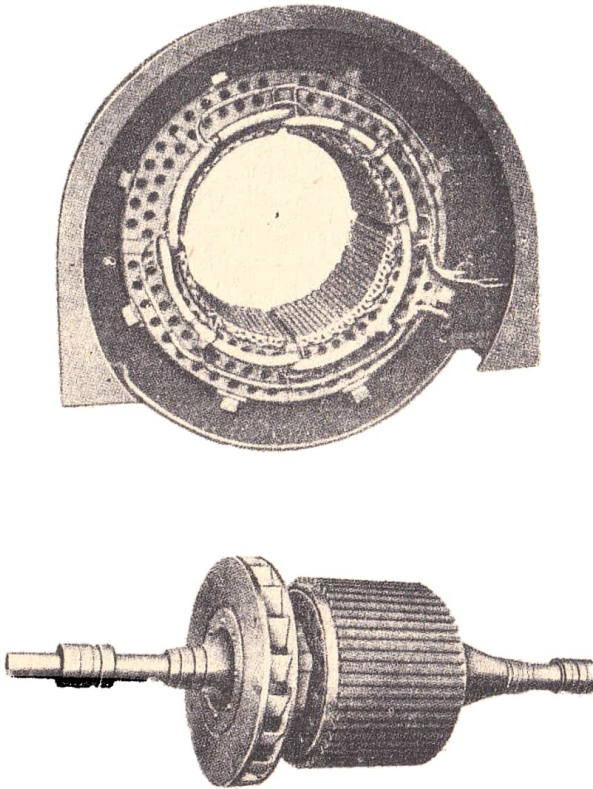


Bild 7 ab Ständer und Läufer eines Mittelfrequenzgenerators

3.3. Addition von sinuöförmigen Wechselsgrößen gleicher Frequenz

Wir hatten den Ausdruck für eine sinusförmige Wechselspannung abgeleitet und erhielten $u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$

Wie wir nun sehen werden, können Wechselspannungen oder Wechselströme trotz Frequenzgleichheit zeitlich gegeneinander verschoben sein.

Bild 8 abc zeigt die drei grundsätzlich möglichen Lagen.

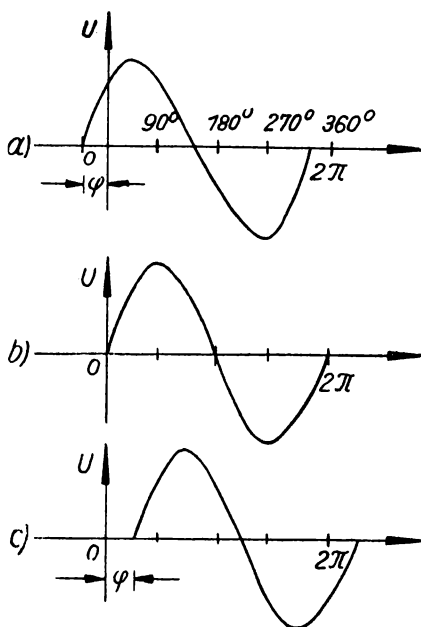


Bild 8 abc Phasenlagen (Liniendiagramme)

Man kennzeichnet die Verschiebung durch den Phasenwinkel φ , der also nach **Bild 8 a und c** die Differenz des tatsächlichen Anfangswertes und des Koordinatenursprungs angibt.

$$u = U_{\max} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi)$$

und entsprechend für den Strom

$$i = I_{\max} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi)$$

wobei das positive Vorzeichen für **Vorellung** und das negative für **Nacheilung** gilt.

Sollen sinusförmige Ströme oder Spannungen gleicher Frequenz mit verschiedener Phase überlagert werden, so kann man diese als Zeiger (Vektoren) zur Zeit $t = 0$ darstellen und mit ihnen rechnen.

Dies stellt, wie wir noch sehen werden, eine große Vereinfachung dar.

Ein derartiger Zeiger beinhaltet nur Betrag und Phasenlage einer Wechselgröße (Bild 9).

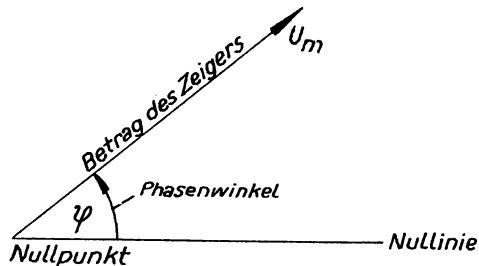


Bild 9 Zeigerdiagramm

Werden zwei Spannungen

$$u_1 = U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ und } u_2 = U_{m2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$$

überlagert, so berechnet sich die Summenspannung wie bei Addition von Kräften nach dem Parallelogrammsatz (Cosinussatz).

$$U_{\text{ges}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$\text{und die Phase zu } \psi = \arctan \frac{U_1 \cdot \sin \varphi_1 + U_2 \cdot \sin \varphi_2}{U_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot \cos \varphi_2}$$

Auf die Ableitung soll verzichtet werden.

Einfacher erhält man die resultierende Spannung und Phase (besonders bei Überlagerung mehrerer Spannungen) geometrisch durch Addition der Zeiger, wie es im **Bild 10** ausgeführt ist.

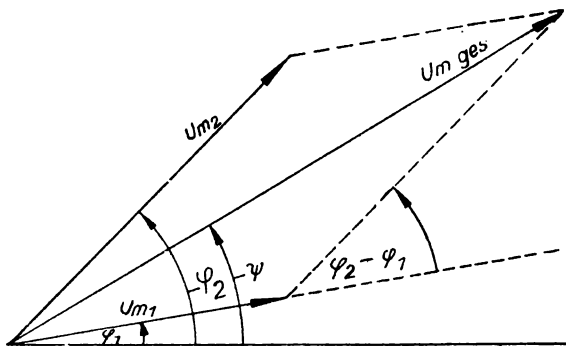


Bild 10 Geometrische Überlagerung zweier Wechselspannungen gleicher Frequenz

1) Man versteht unter dem $\arctan x$ den Winkel (im Bogenmaß), dessen \tan gleich x ist (φ = psi griechischer Buchstabe).

Beispiel:

Gegeben sind die Spannungen

$$U_1 = U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ und } U_2 = U_{m2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$$

wobei

$$U_{m1} = 100 \text{ V}, U_{m2} = 50 \text{ V}, \varphi_1 = 30^\circ \text{ und } \varphi_2 = 60^\circ$$

Gesucht sind Betrag und Phase der Summenspannung

a) rechnerisch

b) zeichnerisch mit Hilfe der Zeigerdarstellung

Lösung:

$$\begin{aligned} U_{\text{mges}} &= \sqrt{10^4 \text{ V}^2 + 0,25 \cdot 10^4 \text{ V}^2 + 1 \cdot 10^4 \text{ V}^2 \cdot \cos 30^\circ} \\ &= \sqrt{10^4 \text{ V}^2 + 0,25 \cdot 10^4 \text{ V}^2 + 0,868 \cdot 10^4 \text{ V}^2} \approx 146 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\psi = \arctan \frac{100 \text{ V} \cdot 0,5 + 50 \text{ V} \cdot 0,87}{100 \text{ V} \cdot 0,5 \sqrt{3} + 50 \text{ V} \cdot 0,5} = \frac{93,5 \text{ V}}{112 \text{ V}} = 0,815 \quad \psi = 39^\circ$$

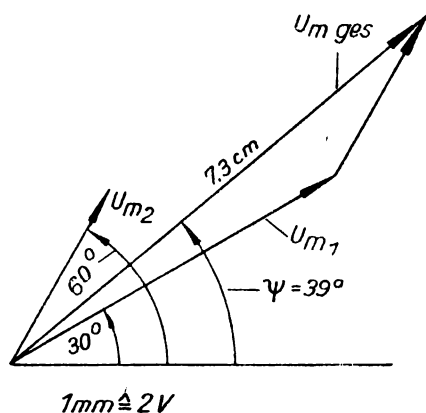


Bild 11 Grafische Lösung

Aus der obenstehenden Zeichnung entnimmt man $\varphi = 39^\circ$, $U_{\text{mges}} = 7,3 \text{ cm}$. Unter Berücksichtigung des Maßstabfaktors ergibt sich für die Gesamtspannung $U_{\text{mges}} = 146 \text{ V}$.

Zusammenfassung

Der große Vorteil des Wechselstroms ist seine Transformierbarkeit. Wird ein Leiter in einem magnetischen Feld bewegt, so entsteht eine Wechselspannung. Die ersten größeren Generatoren wurden 1866 gebaut, nachdem Werner von Siemens mit seinem dynamoelektrischen Prinzip die natürlichen Magnete durch die ungleich stärkeren Elektromagnete ersetzte. Heute werden neben Wechselstromgeneratoren vorwiegend Synchronmaschinen als Drehstromerzeuger verwendet. An einem durch Gleichstrom erregten Magnetfeld befinden sich Spulenwicklungen. Die Feldmagnete rotieren, so daß von der feststehenden Wicklung der Wechselstrom direkt abgenommen werden kann. Die Bezeichnung

„synchron“ besagt, daß die Umdrehungsgeschwindigkeit aller an ein **gemeinsames** Netz angeschlossenen Maschinen entweder gleich oder in festem **Verhältnis** zueinander stehen.

Die Addition von Wechselspannungen bzw. -strömen kann man grafisch und rechnerisch durchführen. Wollen Sie die Gesamtspannung finden, dann bilden Sie nach Art des Kräfteparallelogramms das entsprechende Parallelogramm **mit den** vorgegebenen Werten. Sie können aus diesem Diagramm die **gesuchte Spannung** als Hypotenuse des entstandenen Dreiecks ablesen.

Übungen :

5. Was versteht man unter Einphasenwechselstrom?
6. Was versteht man unter einer Innenpolmaschine?
7. Welche Werte sind bei zwei nacheinander wirkenden Wechselspannungen (frequenzgleich) zu addieren?
8. Nach welchem Prinzip erfolgt im einfachsten Falle die Addition?

3.4. Wechselstromwiderstände

Im Lehrbrief 1 haben wir gelernt Gleichströme und Gleichspannungen in einem Stromkreis zu berechnen, in dem nur Gleichspannungsquellen und ohmsche Widerstände auftreten. Kommen Induktivitäten und Kapazitäten hinzu, so stellt im stationären Zustand, d. h. nach Abklingen des Einschaltvorganges, die ideale Spule nahezu einen Kurzschluß und der ideale Kondensator eine Sperre für den Gleichstrom dar. Unter einer idealen Spule versteht man eine **reine** Induktivität, im Gegensatz zur **technischen** Spule, die außer einer reinen Induktivität noch aus einem ohmschen Widerstand (Widerstand des Wicklungsdrahtes) und einer Kapazität (Windungskapazität) besteht. Unter einem idealen Kondensator versteht man entsprechend eine reine Kapazität, im Gegensatz zum technischen Kondensator, der nach völliger Aufladung noch einen Verluststrom durchläßt. Im allgemeinen soll das Abweichen vom idealen Verhalten gering sein (Gütefaktor!).

Betrachten wir nun einen Stromkreis, der aus Widerständen besteht, aber eine **Wechselspannung** als Spannungsquelle enthalten soll. Die folgenden Abschnitte sollen dazu dienen, Sie mit der Berechnung der einfachsten Wechselstromkreise vertraut zu machen.

Beginnen wir bei einer Parallelschaltung, bestehend aus einem Massewiderstand, einer Spule und einem Kondensator. Diese drei parallelgeschalteten Verbraucher werden zunächst an eine Gleichspannung gelegt (**Bild 12**).

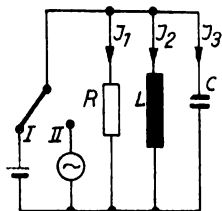


Bild 12 Ohmscher Widerstand, Spule und Kondensator parallel geschaltet

Durch den ohmschen Widerstand R fließt der Strom J_1 , der durch das Ohmsche Gesetz bestimmt ist.

Durch die Spule mit der Induktivität L fließt ebenfalls ein Strom, der durch den ohmschen Widerstand der Spule bestimmt ist (J_2). Durch den Kondensator mit der Kapazität C fließt **kein Gleichstrom** ($J_3 = 0$). Legen wir nun dieselben drei parallelgeschalteten Verbraucher statt an eine Gleichspannung an eine gleichhohe Wechselspannung (Stellung II), so ist der Effektivwert des Wechselstroms durch den ohmschen Widerstand R ebenso groß wie vorher der Gleichstrom J_1 . Der Wechselstrom durch die Spule ist dem vorhergehenden Gleichstrom gegenüber geringer geworden.

Durch den Kondensator fließt im Gegensatz zu vorher ein Wechselstrom J_3 .

Erhöhen wir nun die Frequenz der Wechselspannung, so bleibt der Strom J_1 durch den ohmschen Widerstand unverändert. Der Spulenstrom J_2 wird geringer und der Kondensatorstrom J_3 nimmt zu. Im Hinblick auf das Ohmsche Gesetz können wir sagen:

- a) Ein rein ohmscher Widerstand einer Spule R verändert sich nicht, wenn wir statt Gleichspannung eine Wechselspannung verwenden. Ein rein ohmscher Widerstand R ist ferner frequenzunabhängig.
- b) Der Widerstand einer Spule vergrößert sich bei Wechselstrom; er nimmt mit steigender Frequenz zu.
- c) Der unendlich große Gleichstromwiderstand eines Kondensators wird bei Wechselstrom geringer, er nimmt mit steigender Frequenz ab.

Für Wechselstrom müssen wir also grundsätzlich drei Arten von Widerständen unterscheiden:

Ohmsche Widerstände (Wirkwiderstände) : R

Spulen oder induktive Widerstände : X_L
 Kondensatoren oder kapazitive Widerstände : X_C } (Blindwiderstände)

Ohmscher Widerstand

Eine Wechselspannung $u = u_m \cdot \sin \omega t$ bewirkt durch einen rein Ohmschen Widerstand R einen Wechselstrom $i = i_m \cdot \sin \omega t$. Spannung und Strom sind in Phase, d. h., die Zeiger für Spannung und Strom liegen immer in gleicher Richtung: sie erreichen gleichzeitig ihre Höchstwerte und gehen gleichzeitig durch Null (**Bild 13**). Der Phasenwinkel φ ist Null.

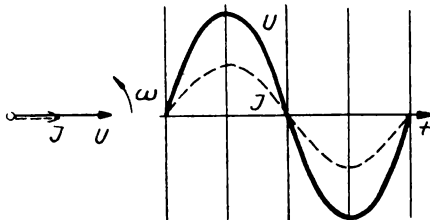


Bild 13 Zeiger- und Liniendiagramm für ohmsche Belastung

Induktiver Widerstand (Spule)

Wie wir bereits im Lehrbrief 2 kennengelernt haben, tritt bei einer Wechselstrom-durchflossenen Spule infolge der Selbstinduktionswirkung eine Verschiebung des Stromes gegenüber der Spannung ein. Nehmen wir an, daß die Spule keinen nennenswerten ohmschen Widerstand besitzt, so beträgt der Phasenwinkel φ

zwischen Spannung und Strom 90° ($= \frac{\pi}{2}$).

Bild 14 zeigt das Zeiger- und Liniendiagramm für eine Spule. Der induktive Widerstand X_L nimmt dabei mit zunehmender Frequenz zu; seine Größe beträgt:

Blindwiderstand
der Spule

$$X_L = \omega \cdot L$$

$$X_L \text{ in } \Omega \quad \omega \text{ in } \frac{1}{s}$$

$$L \text{ in } \Omega \cdot s \text{ bzw. Henry}$$

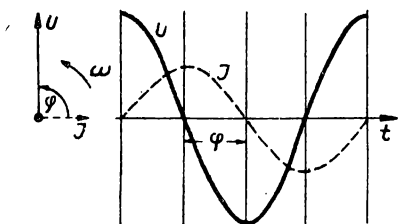


Bild 14 Zeiger- und Liniendiagramm
für induktive Belastung

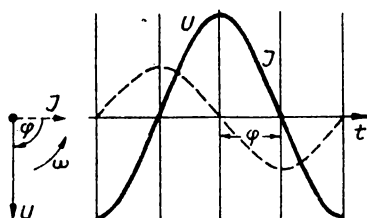


Bild 15 Zeiger- und Liniendiagramm
für kapazitive Belastung

Kapazitiver Widerstand (Kondensator)

Bei Kapazitäten eilen die Lade- und Entladeströme eines Kondensators der Spannung stets voraus. Für sinusförmigen Wechselstrom beträgt der Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom beim Kondensator 90°

Bild 15 zeigt das Zeiger- und Liniendiagramm für einen Kondensator.

Der kapazitive Widerstand nimmt dabei mit zunehmender Frequenz ab; seine Größe beträgt:

Blindwiderstand
des Kondensators

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_C \text{ in } \Omega \quad \omega \text{ in } \frac{1}{s} \quad C \text{ in } \frac{\Omega}{s}$$

Reihenschaltung von R und L.

Der sinusförmige Wechselstrom J durchfließt R und L (**Bild 15**).

Die am ohmschen Widerstand R herrschende Teilspannung U_R ist mit dem Strom J in Phase, während die an der Spule vorhandene Teilspannung U_L dem Strom um 90° vorausseilen muß.

Bild 16 zeigt ferner das Zeiger- und Liniendiagramm für diese Schaltung. Die Gesamtspannung U ergibt sich als Summe der Teilspannungen U_R und U_L , wobei jedoch die Phasenverschiebung berücksichtigt werden muß. Die Schaltung **Bild 16** links kann man als **Ersatzschaltbild** der Spule auffassen. Denn jede Spule enthält außer dem induktiven Widerstand auch noch einen ohmschen Widerstand. Bei Kapazitäten wird der ohmsche Widerstand vielfach vernachlässigt (warum?).

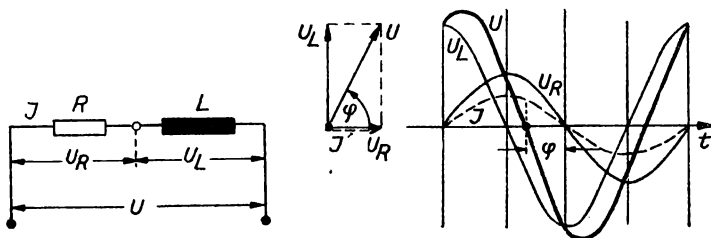


Bild 16 Zeiger- und Liniendiagramm für ohmsche und induktive Belastung

Reihenschaltung von R und C .

Bild 17 zeigt das Schaltbild für eine Reihenschaltung von R und C und das zugehörige Zeigerdiagramm.

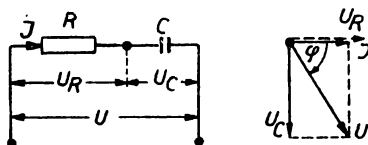


Bild 17 Zeigerdiagramm für ohmsche und kapazitive Belastung

Reihenschaltung von R , L und C

Bei Betrachtung unserer fernmeldetechnischen Apparate und anderen Geräten stellen wir oft fest, daß neben Widerständen auch Spulen und Kondensatoren vorhanden sind. Eine solche Anordnung stellt z. B. die Weckerbrücke in einem Fernsprecherapparat dar. Sie besteht aus dem kapazitiven Blindwiderstand des Kondensators, dem induktiven Blindwiderstand der Weckerspule und dem Wirkwiderstand (ohmscher Widerstand) des Spulendrahtes.

Da ein Kondensator im Wechselstromkreis umgekehrt wie eine Spule wirkt, so ist auch seine phasenverschiebende Wirkung (Spannung eilt nach) umgekehrt wie die einer Spule (Spannung eilt vor). Beide Wirkungen heben sich teilweise oder auch ganz auf, wenn induktive und kapazitive Blindwiderstände im Wechselstromkreis vorhanden sind (Resonanzfall).

Zeichnerische Ermittlung des Widerstandsdiagramms.

Wir zeichnen wie in **Bild 19** dargestellt, die **ohmschen**, **kapazitiven** und **induktiven Widerstände** nach einem beliebigen Maßstab in ein rechtwinkliges Dreieck ein. Aus dem Bild ist zu ersehen, daß für die Größe des Blindwiderstandes der Unterschied zwischen induktivem und kapazitivem Blindwiderstand maßgebend ist.

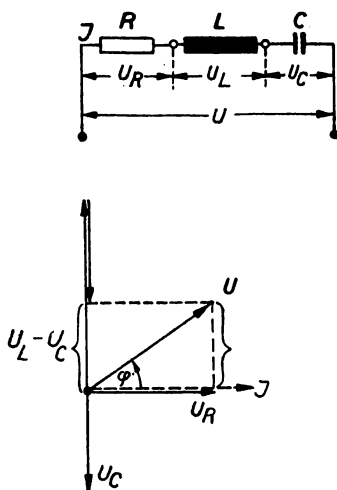


Bild 18 Reihenschaltung von R , L und C und Zeigerdiagramm der Spannungen

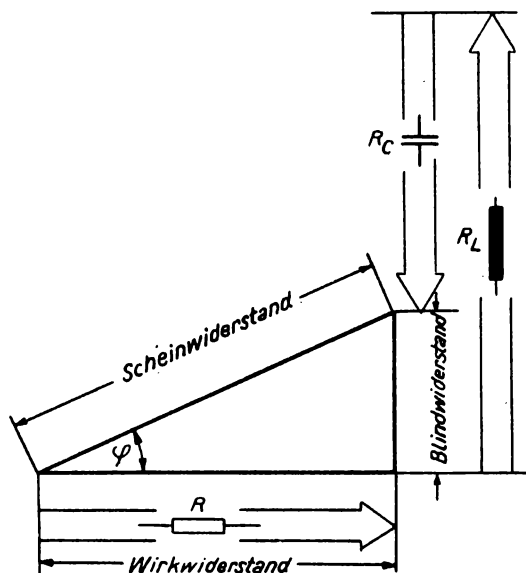


Bild 19 Zeichnerische Ermittlung des Scheinwiderstandes

Beispiel:

Wie groß ist der Scheinwiderstand der abgebildeten Reihenschaltung (**Bild 18**), wenn ein Wechselstrom mit einer Frequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ hindurchfließt? Die Schaltelemente haben folgende Werte:

$$R = 600 \, \Omega, L = 3 \text{ H und } C = 4 \, \mu\text{F}$$

Lösung:

$$R_L = \omega \cdot L$$

$$R_L = 314 \frac{1}{\text{s}} \cdot 3 \, \Omega \text{ s}$$

$$R_L = 942 \, \Omega$$

$$R_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$R_C = \frac{1}{314 \frac{1}{\text{s}} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{s}}{\Omega}}$$

$$R_C = 796 \, \Omega$$

Den Maßstab wählen wir so, daß 1 Millimeter $10 \, \Omega$ entspricht (**Bild 20**). Wir messen nun die Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks und erhalten 62 mm. Das entspricht nach unserem Maßstab einem Scheinwiderstand von $620 \, \Omega$.

Maßstab $100 \, \Omega = 1 \text{ cm}$

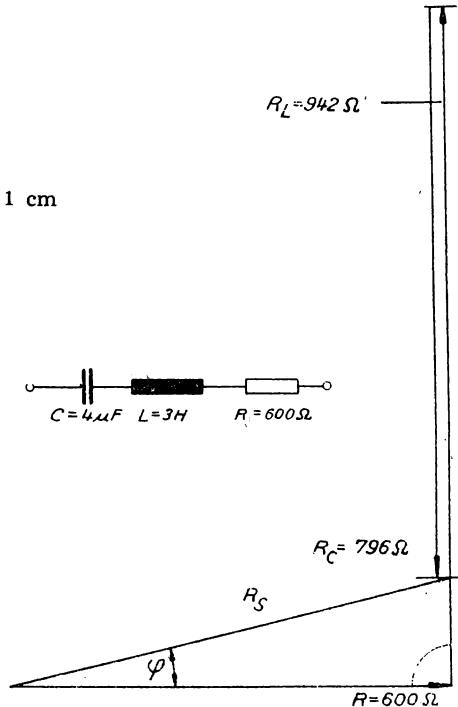


Bild 20 Maßstäbliches Zeigerdiagramm zum Beispiel

Rechnerische Ermittlung

Wie bei der zeichnerischen Methode zeigt sich auch in der mathematischen Formel für die Errechnung von **Scheinwiderständen** mit ohmschen, induktiven und kapazitiven Anteilen die Differenz der beiden Blindwiderstände. Die Formel lautet:

$$R_s^2 = R^2 + X^2$$

daraus folgt

$$R_s = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}$$

Setzen wir die Werte der vorangestellten Beispiele in die Formel ein, so ergibt sich:

$$R_s = \sqrt{600^2 \Omega^2 + (942 - 796)^2 \Omega^2}$$

$$R_s = 618 \Omega$$

Wir erkennen, daß die rechnerische Lösung im allgemeinen genauere Werte liefert. Die Darlegungen über das Verhalten der Widerstände im Wechselstromkreis soll Ihnen einen gewissen Überblick verschaffen. Es ist nicht beabsichtigt, Ihnen umfangreiche Berechnungen darzulegen. Sie sollen lediglich das physikalische Verhalten der wichtigsten Bauelemente kennenlernen.

Setzen Sie in die oben zuletztgenannte Formel für R_s gemäß dem Ohmschen Gesetz $Z = \frac{U}{I}$ ein, so gewinnt man durch Umstellung nach U das **Ohmsche Gesetz für den Wechselstromkreis**.

Ohmsches Gesetz
im Wechselstromkreis

$$U = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Das Verhältnis $\frac{U}{I}$ ist also nunmehr der Scheinwiderstand R_s des Stromkreises.

In der Literatur wird er häufig auch mit Z bezeichnet. Die Phasenverschiebung können Sie selbst aus dem Widerstandsdiagramm ablesen (**Bild 19 oder 20**).

$$\cos \varphi = \frac{R}{R_s}$$

Schwieriger liegen die Verhältnisse bei einer Parallelschaltung von R , L und C . Das **Bild 21** zeigt Ihnen neben der Schaltung das Zeigerdiagramm der Ströme.

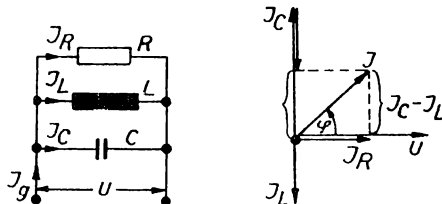


Bild 21 Parallelschaltung von R , L , C und Zeigerdiagramm

Beachten Sie bei allen diesen Rechnungen immer, daß die Zerlegung eines Stromes in Wirk- und Blindstrom nur eine rein rechnerische Maßnahme ist; in Wirklichkeit ist eine solche Trennung praktisch nicht möglich. Dasselbe gilt auch für Wirk- und Blindwiderstände sowie Wirk- und Blindleitwerte.

Folgender Fehler wird bei Anfängern, bei denen die Begriffe noch nicht ganz fest sitzen, häufig gemacht:

Sie haben gelernt, daß die vektorielle Summe von Wirk- und Blindwiderstand als Scheinwiderstand bezeichnet wird, und man spricht von einem Scheinleitwert als vektorielle Summe von Wirk- und Blindleitwert. Ebenso ist, wie Sie gelesen haben, der Strom J eine vektorielle Zusammensetzung von Wirk- und Blindstrom. Lassen Sie sich aber nicht dazu verleiten, diesen Strom etwa analog den obigen Bezeichnungen für die Widerstände und Leitwerte als „Scheinstrom“ zu bezeichnen. **Der Strom J wird von den Strommessern angezeigt und ist wirklich vorhanden, also keine Scheingröße.**

Aus dem gleichen Grunde kann eine Wechselspannung, die sich bekanntlich in eine Wirk- und Blindspannung zerlegen läßt, keine „Scheinspannung“ sein. Diese beiden Begriffe dürfen also in Ihrem Wortschatz an Fachausdrücken nicht vorkommen!

Beispiel:

Eine Drossel mit der Induktivität $L = 0,5 \text{ H}$ wird an ein Wechselstromnetz 220 V , 50 Hz angeschlossen. Welcher Strom fließt durch die Drossel?

Lösung:

Unter Voraussetzung einer idealen Spule gilt

$X_L = \omega \cdot L$ und Anwendung des Ohmschen Gesetzes

$$J = \frac{U}{Z} \text{ folgt: } J = \frac{U}{\omega \cdot L} = \frac{220 \text{ V}}{2 \pi \cdot 50 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,5 \text{ Vs} \cdot \text{A}^{-1}} = 1,1 \text{ A}$$

Beispiel:

Wie groß ist der Strom J in den nachstehenden Schaltungen (Bild 22ab)? (C in μF und L in H)

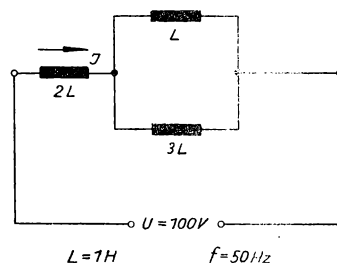
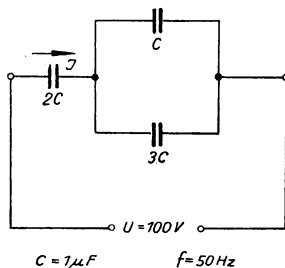


Bild 22 ab Schaltbild zum Beispiel

Lösung:

Die beiden parallelgeschalteten Kapazitäten ergeben eine Ersatzkapazität von 4 C und dazu 2 C in Reihe geschaltet ergeben eine Gesamtkapazität von

$$C_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{4C} + \frac{1}{2C}} \quad C_{\text{ges}} = \frac{4 \cdot 2 C^2}{(4+2)C} = \frac{8 C^2}{6 C} = \frac{4}{3} C = 1,33 \mu\text{F}$$

$$J = \frac{U}{R_{\text{sges}}} = U \cdot \omega \cdot C_{\text{ges}} = 100 \text{ V} \cdot 314 \text{ s}^{-1} \cdot 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ As} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$J = 41,6 \text{ mA}$$

Die beiden parallelgeschalteten Induktivitäten ergeben eine Ersatzinduktivität von

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \frac{1}{1L} + \frac{1}{3L} \quad L_{\text{ers}} = \frac{3}{4} L$$

$$\frac{3}{4} L \text{ und } 2 L \text{ in Reihe geschaltet liefert } \frac{11}{4} L = \frac{11}{4} \text{ H}$$

$$J = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{U}{\omega L_{\text{ges}}} = \frac{100 \cdot 4 \text{ A}}{314 \text{ s}^{-1} \cdot 11 \text{ Vs}} = \frac{400}{3450} \text{ A}$$

$$J = 0,116 \text{ A}$$

Beispiel:

An der Netzspannung von 220 V, 50 Hz liegt die Reihenschaltung einer Drossel und eines ohmschen Verbrauchers.

Die Drossel besitzt einen Widerstand von $R = 20 \Omega$ (Widerstand der Wicklung) und eine Induktivität von $L = 0,4 \text{ H}$.

Der Widerstand des Verbrauchers trägt $R = 150 \Omega$.

Berechne den Strom sowie die Spannungen über der Drossel und dem Verbraucher.

Lösung:

$$\text{Nach } J = \frac{U}{R_s} = \frac{U}{Z}$$

$$J = \frac{220 \text{ V}}{\sqrt{(170 \Omega)^2 + (314 \text{ s}^{-1} \cdot 0,4 \text{ VsA}^{-1})^2}}$$

$$J = \frac{220 \text{ V}}{\sqrt{4,48 \cdot 10^4 \Omega^2}} = \frac{220 \text{ V}}{212 \Omega}$$

$$J \approx 1,04 \text{ A}$$

Die Spannungsabfälle ergeben sich nach dem Ohmschen Gesetz als Produkt von Strom und Widerstand. Der Widerstand der Drossel beträgt

$$R_s = \sqrt{400 \Omega^2 + 1,59 \cdot 10^4 \Omega^2}$$

$$R_s \approx 128 \Omega$$

Also

$$U_D = 1,04 \text{ A} \cdot 128 \Omega = 132 \text{ V}$$

$$U_{\text{Verbr.}} = 1,04 \text{ A} \cdot 150 \Omega = 156 \text{ V}$$

Beachten Sie hierbei, daß die Gesamtspannung die vektorielle Summe der Einzelspannungen ist!

Eine wichtige Erscheinung in der Wechselstromtechnik sei in diesem Zusammenhang noch erwähnt. Bei einer Reihenschaltung von Induktivität und Kapazität tritt bei einer bestimmten Frequenz Resonanz auf.

Diese Frequenz ermittelt sich aus dem Ansatz

Resonanz-
bedingung

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\text{also } \omega = \frac{1}{L \cdot C}$$

da $\omega = 2\pi \cdot f$ ergibt sich:

Thomson-
Formel

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Der Scheinwiderstand $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$ ist bei der Resonanzfrequenz ein

Minimum, nämlich R , bei konstanter Gesamtspannung der Strom also ein Maximum. An L und C treten Spannungsüberhöhungen auf, die sich jedoch in ihrer Gesamtwirkung nach außen kompensieren. Bei der Parallelschaltung von L und C kehren sich die Verhältnisse um. Der Scheinwiderstand wird bei der Resonanzfrequenz ein Maximum. Bedeutung haben diese Schwingungen vor allem beim Bau von elektrischen Filtern.

Zusammenfassung

Im rein induktiven Stromkreis besteht zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 90° , die Spannung eilt dem Strom voraus. Der induktive Blindwiderstand entsteht durch die Wirkung der Selbstinduktion.

Der durch einen verlustlosen Kondensator fließende Wechselstrom ist gegen die Spannung um 90° vorauseilend phasenverschoben. Infolge des unvermeidlichen Widerstandes ist aber die Phasenverschiebung immer kleiner als 90° .

Die Reihenschaltung einer Spule und eines Kondensators bildet einen Schwingkreis. Bei einer bestimmten Frequenz heben sich die vorauseilenden und nach-eilenden Spannungen auf. Der Scheinwiderstand ist eine viel gebrauchte Bezeichnung für den Wechselstromwiderstand. Er umfaßt einen Wirk- und Blindanteil.

Übungen:

9. Ein Kondensator von $C = 8 \mu\text{F}$ ist an eine Wechselspannung von $U = 220 \text{ V}$ bei $f = 50 \text{ Hz}$ angeschlossen. Zu berechnen ist der kapazitive Blindwiderstand und die Stromstärke (C ohne Verluste).
10. Eine Spule mit $L = 0,2 \text{ H}$ ist an eine Wechselspannung von 125 V bei $f = 50 \text{ Hz}$ angeschlossen. Zu berechnen ist der Blindwiderstand und die Stromstärke (L ohne Verluste).
11. Was versteht man unter Blindwiderstand?

12. Was versteht man unter Blindstrom?

13. Wie groß ist der Scheinwiderstand der Reihenschaltung, wenn ein Wechselstrom von $f = 50 \text{ Hz}$ durch $R = 600 \, \Omega$, $L = 3 \text{ H}$ und $C = 4 \, \mu\text{F}$ hindurchfließt? Geben Sie die zeichnerische Ermittlung an.

3.5. Leistung

Wie Ihnen bekannt, ist die elektrische Leistung bei Verwendung von Gleichstrom gleich dem Produkt aus Strom und Spannung (Lehrbrief 1).

Bei Wechselströmen und -spannungen ergibt sich die Leistung zunächst als Momentanleistung aus dem Produkt der einander zugehörigen Momentanwerte von Strom und Spannung $p = u \cdot i$.

Bei ohmscher Belastung liegt die Spannung mit dem Strom in Phase. Die Leistung schwankt dann ständig zwischen Null und einem Maximalwert (Bild 23). Die Leistung kehrt ihre Richtung nicht um (Bild 23 unten), denn das Produkt aus $U \cdot I$ ergibt stets wieder positive Werte! Diese Leistung wird in der Spannungsquelle erzeugt und im Verbraucher zur Erzielung einer bestimmten Wirkung in eine andere Energieform umgewandelt. Sie wird deshalb als **Wirkleistung** bezeichnet. Die ohmschen Widerstände, in denen Wirkleistung umgesetzt wird, heißen auch **Wirkwiderstände**.

Die Maßeinheit für die Wirkleistung ist wie bei Gleichstrom das Watt bzw. Kilowatt (kW).

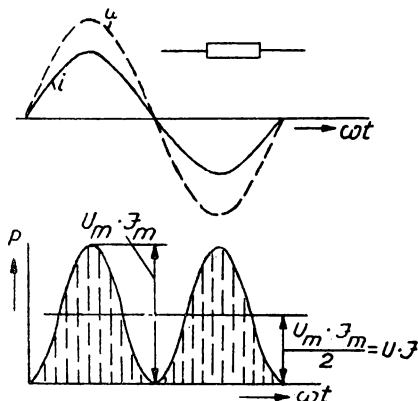


Bild 23 Diagramm für die Wirkleistung

Liegen nun im Stromkreis Induktivitäten bzw. Kapazitäten, so tritt zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung ein.

Die Wirkleistung muß dann mit einem Korrekturfaktor versehen werden, der die Phasenverschiebung berücksichtigt. Man bezeichnet diesen Faktor **Leistungsfaktor**. Er ist stets kleiner als 1.

$$P = U \cdot I \cdot \text{Leistungsfaktor}$$

Der Leistungsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung. Er ist das Verhältnis: Ankathete zu Hypotenuse, also des Kosinus des Leistungswinkels φ (vergl. Bild 24).

Leistung des
Wechselstroms

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

Berechnen wir in gleicher Weise die in einer Drosselspule oder in einem Kondensator umgesetzte Leistung, so erhalten wir wegen der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung eine pendelnde Leistung. Sie trägt nicht unmittelbar zum Energieumsatz bei und wird mit **Blindleistung** bezeichnet. Die Widerstände

ωL bzw. $\frac{1}{\omega C}$ werden deshalb auch als Blindwiderstände (Reaktanzen) bezeichnet. Die Blindleistung bleibt auf den elektrischen Stromkreis beschränkt und tritt nach außen nicht in Erscheinung, deshalb wird für die Blindleistung nicht die Maßeinheit Watt, sondern Var bzw. kVar oder MVar (Voltampere reaktiv) verwendet. Als reine Rechengröße wird außerdem für das Produkt aus Spannung und Strom (Effektivwerte) ohne Rücksicht auf Phasenverschiebung die Scheinleistung eingeführt.

Scheinleistung

$$P_s = U \cdot J$$

Sie wird in Voltampere (VA) bzw. (kVA) gemessen (z. B. abgegebene Leistungen von Generatoren oder Transformatoren).

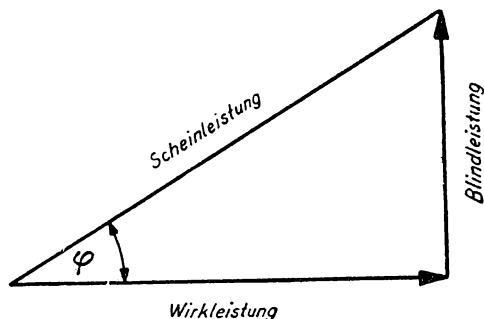


Bild 24 Leistungs-dreieck

Die Formel für die Berechnung der Blindleistung im Wechselstromkreis können wir mit Hilfe des $\sin \varphi$ ebenfalls aus Bild 24 ableiten.

Blindleistung

$$P_t = U \cdot J \cdot \sin \varphi$$

^{*)} Bezeichnung der Wechselstromgrößen nach DIN 40110.

Zusammenfassend lässt sich sagen:

Wirkleistung tritt dort auf, wo der Verbraucher einen Wirkwiderstand enthält. Reine Wirkleistung nur dann, wenn der Verbraucher selbst ein reiner Widerstand ist oder wenn die noch enthaltenen Blindwiderstände sich kompensieren.

Die Wirkleistung ist die im zeitlichen Mittel tatsächlich abgegebene Leistung; sie kann in eine andere Energieform umgewandelt werden. Entsprechend ist eine **Blindleistung** vorhanden, wenn der Verbraucher Blindschaltelemente enthält, die sich in ihrer Wirkung nicht kompensieren.

Reine Blindleistung liegt vor, wenn $\varphi = 90^\circ$. Dies ist bei reinen Blindschaltelementen der Fall, kann sich aber auch bei kombinierten Schaltelementen ergeben.

Die Blindleistung ist im allgemeinen unerwünscht (jedoch infolge der verzögerten Wirkung der Selbstinduktion bedingt), da sie höhere Ströme und damit größere Verluste im Generator und in den Übertragungsleitungen bedingt. Durch entsprechende Tarife u. ä. suchen die E-Werke einen möglichst hohen Leistungsfaktor zu erzwingen:

$\cos \varphi = 0,8$ bzw. $0,9$ gelten als Normalwerte.

Die **Scheinleistung** ist gleich dem Produkt aus den Effektivwerten von Strom und Spannung ohne Rücksicht auf die Phasenverschiebung. Die Scheinleistung ist in der Starkstromtechnik maßgebend für die Bemessung von Maschinen und Transformatoren.

Auch Strom und Spannung kann in einen Wirk- und Blindanteil zerlegt werden, wie Sie bereits schon wissen, dann ist:

$$U_w = U \cdot \cos \varphi$$

$$U_b = U \cdot \sin \varphi$$

$$J_w = J \cdot \cos \varphi$$

$$J_b = J \cdot \sin \varphi$$

Auch Blind- und Gesamtanteil bilden, wie in **Bild 24** (Leistungsdreieck) ein rechtwinkliges Dreieck, und nach dem pythagoreischen Lehrsatz ist die Summe der Quadrate von Wirk- und Blindanteil gleich dem Quadrat des **angezeigten** Gesamtanteils.

Mit dem Meßinstrument wird stets der Gesamtanteil gemessen.

(Gesamtstrom, Gesamtspannung)

Für die Leistung kommt nur die Wirkkomponente der Stromstärke in Betracht. Die Leistungsformel für Wechselstrom erhält somit die Form $P = U \cdot J_w$ oder, da $J_w = J \cdot \cos \varphi$ ist

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

Beispiel:

Wie groß sind der Leistungsfaktor und der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung eines Verbrauchers, wenn folgende Werte gemessen wurden?
570 W, 220 V und 3,36 A

Lösung:

$$\begin{aligned}\cos \varphi &= \frac{P}{\bar{U} \cdot J} = \frac{570 \text{ W}}{220 \text{ V} \cdot 3,36 \text{ A}} \\ \cos \varphi &= \mathbf{0,77} \\ \varphi &\approx \mathbf{40^\circ}\end{aligned}$$

Beispiel:

Ein Wechselstrommotor für 220 V entnimmt dem Netz einen Strom von 0,85 A bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,75$. Berechnen Sie die elektrische Arbeit für eine Betriebszeit von 8 Stunden.

Lösung:

$$\begin{aligned}W^1) &= U \cdot J \cdot \cos \varphi \cdot t \\ W &= 220 \text{ V} \cdot 0,85 \text{ A} \cdot 0,75 \cdot 8 \text{ h} \\ W &= \mathbf{1,22 \text{ kWh}}\end{aligned}$$

Beispiel:

Eine **Gleichstrommaschine** nimmt bei 220 V eine Leistung von 10 kW auf. Wie groß ist die Stromstärke?

Lösung:

$$J = \frac{P}{U} = \frac{10000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = \mathbf{45,5 \text{ A}}$$

Beispiel:

Eine **Wechselstrommaschine** arbeitet unter gleichen Bedingungen bei einem $\cos \varphi = 0,5$. Wie groß ist die Stromstärke?

Lösung:

$$\frac{10000 \text{ W}}{220 \text{ V} \cdot 0,5} = \mathbf{90,9 \text{ A (!)}}$$

Beispiel:

Ein Wechselstrommotor entnimmt bei 220 V dem Netz 40 A bei einem $\cos \varphi = 0,85$ und einem **Wirkungsgrad** von 0,8 (= 80 %)!
Berechne: P_w , P_b , P_s , P_{ab} , J_w , J_b und J .

Lösung:

$$\begin{aligned}P &= U \cdot J \cdot \cos \varphi \\ P &= 220 \text{ V} \cdot 40 \text{ A} \cdot 0,85 \\ P &= \mathbf{7,48 \text{ kW}} \\ P_b &= U \cdot J \cdot \sin \varphi\end{aligned}$$

1) Nach DIN 1304 $W = \text{Arbeit}$ (auch W_{el})

$$P_b = 220 \text{ V} \cdot 40 \text{ A} \cdot 0,52$$

$$P_b = 4,57 \text{ kVar (reaktanz!)}$$

Achtung!

$$\cos \varphi = 0,85 \text{ entspricht } \approx 32^\circ$$

$$\sin 32^\circ = 0,52$$

$$P_s = U \cdot J$$

$$P_s = 220 \text{ V} \cdot 40 \text{ A} = 8,8 \text{ kVA}$$

$$P_{ab} = P_{zu} \cdot \eta = U \cdot J \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

$$P_{ab} = 7,48 \text{ kW} \cdot 0,8 = 5,99 \text{ kW}$$

$$J_w = J \cdot \cos \varphi = 40 \text{ A} \cdot 0,85 = 34 \text{ A}$$

$$J_b = J \cdot \sin \varphi = 40 \text{ A} \cdot 0,52 = 21 \text{ A}$$

Der vom **Strommesser** angezeigte Gesamtstrom ist 40 A, den man auch rechnerisch ermitteln kann.

$$J = \sqrt{J_w^2 + J_b^2}$$

$$J = \sqrt{34^2 + 21^2} = 40 \text{ A}$$

Zeichnen Sie selbst das Leistungs- und das Stromdreieck!

Beispiel:

Ein Wechselstrommotor hat die Leistung von 20 kW, sein Wirkungsgrad beträgt $\eta = 85\%$, sein Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,75$.

Der Motor liegt an einer Spannung $U = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Welche **Kapazität** muß zum Zwecke einer Phasenkompensierung parallel geschaltet werden, damit der aus dem Netz entnommene Strom mit der Spannung in Phase bleibt?

Lösung:

Es muß also zunächst der vom Motor aufgenommene induktive Blindstrom berechnet werden. Der durch die Kapazität fließende Strom muß dann dieselbe Größe haben, wenn sich beide Ströme kompensieren sollen.

Unter der Leistung eines Motors ist, wie üblich, die nutzbar an der Welle abgegebene mechanische Leistung zu verstehen.

Der Motor nimmt dann eine elektrische Leistung

$$P = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} = \frac{20 \text{ kW}}{0,85} = 23,5 \text{ kW auf.}$$

Der Gesamtstrom ergibt sich zu

$$J = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{23500 \text{ W}}{220 \text{ V} \cdot 0,75} \approx 143 \text{ A}$$

Der aufgenommene Blindstrom ist

$$J_b = J \cdot \sin \varphi = 143 \text{ A} \cdot 0,66 = 94,5 \text{ A}$$

Der Strom durch den Kondensator fließt

$$J_b = U \cdot \omega C$$

Hieraus die Kapazität C

$$C = \frac{J_b}{U \cdot \omega} = \frac{94,5 \text{ A}}{220 \text{ V} \cdot 314 \text{ s}^{-1}} = 1,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{As}}{\text{V}}$$
$$C = 1370 \mu\text{F}$$

Der Blindstrom des Motors eilt der Spannung U um 90° nach (induktiv), der Blindstrom der Kapazität vom gleichen Betrag der Spannung um 90° vor. Der resultierende Blindstrom ist also gleich Null.

Vom Stromerzeuger fließen dann nur noch

$$J = \frac{P}{U \cdot 1} = \frac{23500 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 107 \text{ A}$$

zum Motor. (Bei Kompensation auf $\varphi = 0$ ist $\cos \varphi = 1$. Das bedeutet Entlastung der vorhandenen Querschnitte [Leitungen!].)

Im allgemeinen begnügt man sich, die Kompensierung nur bis zu einer bestimmten Höhe vorzunehmen ($\cos \varphi \approx 0,85$), weil die zu beschaffenden Kapazitäten, die solch eine hohe erforderliche Blindleistung abgeben können, verhältnismäßig groß und auch teuer werden. Entscheidend ist, daß Sie erkennen, welche Bedeutung eine derartige Verschlechterung des Leistungsfaktors für die Erzeugung und Übertragung der Energie für die Elektrizitätswerke hat. Da die ursprünglich geplanten Kraftwerke zumeist für einen $\cos \varphi = 0,8$ gebaut waren und die Blindleistung zu gering veranschlagt wurde, gelangten die Werke infolge des absinkenden Leistungsfaktors auf der Abnehmerseite auf den Zustand der Vollast. Daher bleibt es noch nicht aus, daß besonders kleinere Kraftwerke Blindstrom erzeugen müssen und diesen an das Landesnetz abgeben.

In jeder größeren elektrischen Anlage ist daher ein Leistungsfaktormesser eingebaut.

Zusammenfassung

Sie haben die verschiedenen Leistungsformen im Wechselstromkreis kennengelernt. Nur durch Wirkleistung kann Wärme oder mechanische Leistung erzeugt werden. Jedoch zum Aufbau elektrischer und magnetischer Felder muß ebenfalls vom Stromkreis Leistung aufgebracht werden (positive Leistung), die beim Abbau der Felder wieder im Stromkreis aufgenommen werden muß (negative Leistung). Die dadurch entstehende Blindleistung bzw. der Blindstrom vermindert die Wirkstromabgabe. Auf diese Art und Weise entstehen Verluste jedoch lediglich beim Verbraucher. Für Generatoren und Transformatoren ist dieser Strom kein Blindstrom. Er muß im Gegenteil zusätzlich mit aufgebracht werden. Daher ist man bestrebt, seitens des Erzeugers die Blindlast im Netz in erträglichen Grenzen zu halten durch Blindstrommaschinen (übererregte Synchronmotoren) und auf der Verbraucherseite durch Kondensatoren, die in

großen Betrieben über Relais selbsttätig gesteuert werden (Anpassung an die Blindlast) und den Leistungsfaktor auf den geforderten Wert halten.

Übungen :

14. Erzeugt der Blindstrom eines Verbrauchers in der Leitung auch Wärme?
15. Welche Arten von Blindleistung kennen Sie und wie unterscheiden sich diese voneinander?
16. Welches Verhältnis charakterisiert der Leistungsfaktor?
17. Warum hat der Leistungsfaktor in der Energieversorgung solche große Bedeutung?
18. Durch welche Maßnahmen kann man den Leistungsfaktor verbessern?
19. Der Leistungsfaktor eines Einphasenmotors von 1,5 kW Wirkleistung beträgt 0,89. Welcher Strom fließt bei einer Netzspannung von 220 V?
20. Ein Motor gibt bei $\eta = 0,9$ eine Leistung von 2 kW ab. Das angekoppelte Getriebe hat einen Wirkungsgrad von 70 %. Wie groß ist der Gesamtwirkungsgrad der Anlage?

3.6. Mehrphasenwechselstrom

Bei der Erzeugung von Einphasenwechselstrom wurde die Wechselspannung in einer Ankerspule induziert. Ordnet man z. B. bei einer Innenpolmaschine auf dem Ankerumfang mehrere getrennte Wicklungen an, die gegeneinander versetzt sind, so wird beim Umlaufen des Polrades nacheinander in jeder Wicklung eine Spannung induziert. Allgemein bezeichnet man als **Mehrphasensystem** ein Stromsystem, bei dem im Generator in der oben beschriebenen Weise mehrere gegeneinander phasenverschobene Spannungen erzeugt werden. Der Phasenwinkel ist bei einer zweipoligen Maschine gleich dem Winkel, um den die einzelnen Wicklungen gegeneinander versetzt sind. Außer dem Dreiphasensystem finden noch in besonderen Fällen Verwendung das **Zweiphasensystem**, wobei die beiden Spannungen gegeneinander um 90° verschoben sind, und das **Sechssystem**, wobei die sechs Spannungen um je 60° gegeneinander verschoben sind, sowie das **Zwölfphasensystem** mit zwölf um je 30° gegeneinander verschobenen Spannungen.

Wegen seiner großen wirtschaftlichen Vorteile bei der Verteilung der Energie (Stern-Dreieckschaltung) und beim Bau von Motoren (Drehfeld) wird fast ausschließlich das **Dreiphasensystem** (Drehstromsystem) angewendet.

Drehstrom ist also keine neue Stromart, sondern lediglich ein Wechselstrom, der aber gegenüber dem Einphasenwechselstrom wesentliche Vorteile hat. 1887 wurde der Drehstrom von dem in den USA lebenden südslawischen Ingenieur Nicola Tesla in die Technik eingeführt, und 1891 baute man anlässlich der Ausstellung in Frankfurt a. M. die erste Drehstromübertragung über 175 km von Lauffen a. Neckar nach Frankfurt a. M. Die übertragene Leistung betrug rund 200 PS. Seit dieser Zeit wird für die Übertragung von Elektroenergie auf große Entfernungen fast ausschließlich Drehstrom verwendet.

3.6.1. Erzeugung des Drehstromes. In Bild 25 a ist der grundsätzliche Aufbau eines Drehstromgenerators (Innenpolmaschine) dargestellt.

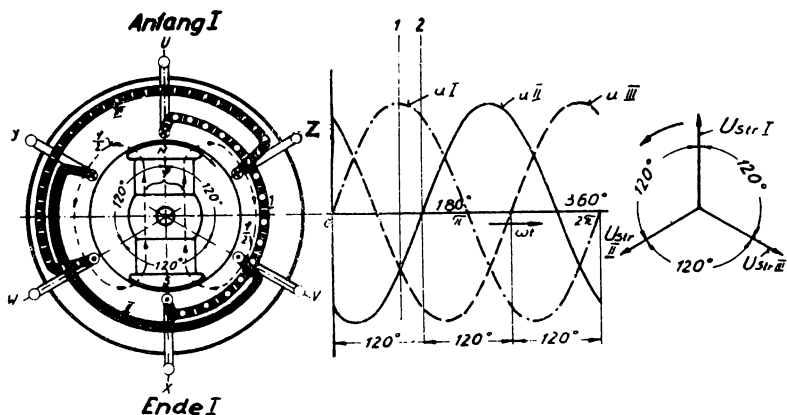


Bild 25 abc Zweipoliger Dreiphasen-Wechselstromgenerator mit Linien- und Zeigerdiagramm

In **Bild 25 c** erkennt man leicht, daß die drei Spulen um 120° versetzt sind. Dieses Bild vermittelt nur einen groben Überblick, denn tatsächlich überdecken sich teilweise die einzelnen Wicklungen, wie in **Bild 25 a** gezeigt wird. Die Wicklungen sind hier in ihrer Gesamtheit gezeichnet. Sie ergeben sich durch entsprechende Zusammenschaltung der am Ankerumfang in Nuten gebetteten Stäbe.

In **Bild 25 b** ist der Spannungsverlauf in den drei Wicklungen I, II, III bei einer Umdrehung des Polrades dargestellt. Man ersieht hieraus:

Bei drei räumlich um 120° versetzten Spulen I, II, III erhält man drei um 120° zeitlich versetzte Spannungen I, II, III.

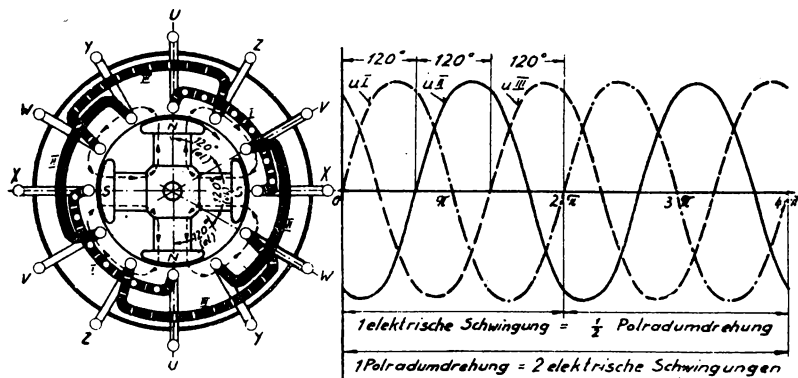


Bild 26 ab Vierpoliger Generator mit Liniendiagramm

Zur Fortleitung der drei induzierten Spannungen benötigt man nicht 6 Leitungen, wie man zunächst annehmen möchte, sondern nur drei. Es ist hierzu erforderlich, die einzelnen Wicklungen in einer bestimmten Weise zu „verketteten“.

Die beiden Möglichkeiten der Verkettung sind die Stern- und die Dreieckschaltung.

3.6.2. Verkettungsschaltungen. Durch Verkettung der drei Einphasensysteme gelangte man zum leistungssparenden Dreiphasen-Wechselstrom- oder Drehstromsystem.

Drehstrom: Stromkombinationen aus 3 Wechselströmen gleicher Frequenz mit gleichen Werten und gegenseitiger Phasenverschiebung von jeweils $\frac{1}{3}$ Periode.

Die einzelnen Schaltarten werden anschließend dargeboten. Zunächst sollen die Begriffe und Bezeichnungen, die nach DIN 40108 festgelegt worden sind, behandelt werden. Nach DIN 40108 werden Strangströme mit J_{UX} bzw. J_{VY} und J_{WZ} und Strangspannungen mit U_{UX} bzw. U_{VY} und U_{WZ} bezeichnet.

Die Verkettete oder Außenleiterspannung (auch Netzspannung genannt) wird mit U_{RS} bzw. U_{ST} und U_{TR} bezeichnet.

Da nur gleichmäßig belastete Dreiphasensysteme behandelt werden, sollen in der Kennzeichnung der Ströme und Spannung Vereinfachungen verwendet werden.

Strangspannung	U nicht mehr U_{Str}
Strangstrom	J nicht mehr J_{Str}
Außenleiterspannung (Leiterspannung)	U_L (verkettete Spannung)
Leiterstrom	J_L

Je nachdem, wie die Verkettung der einzelnen Stränge vorgenommen wird, spricht man von der **Stern-** oder von der **Dreieckschaltung**.

Bei Sternschaltung werden die 3 Enden (oder Anfänge) der einzelnen Stränge in einem Stern- oder Knotenpunkt vereinigt, also in Gegenreihenschaltung zusammengefaßt. Es ergeben sich somit nur 3 Außenleiter, denen die Kennbuchstaben R, S und T und die Kennfarben gelb, grün und violett zugeordnet sind (**Bild 27 ab**). (Ziehen Sie in den Bildern die Leiter in den angeordneten Kennfarben nach, damit Sie sich die Schaltbilder entsprechend einprägen.) Der Verbraucher ist in diesem Fall ein elektrisches Heizgerät (ohmscher Verbraucher). Nun sollen die Strom- und Spannungsverhältnisse der **Sternschaltung** untersucht werden, wobei nochmals betont wird, daß gleichmäßige Belastung angenommen wird.

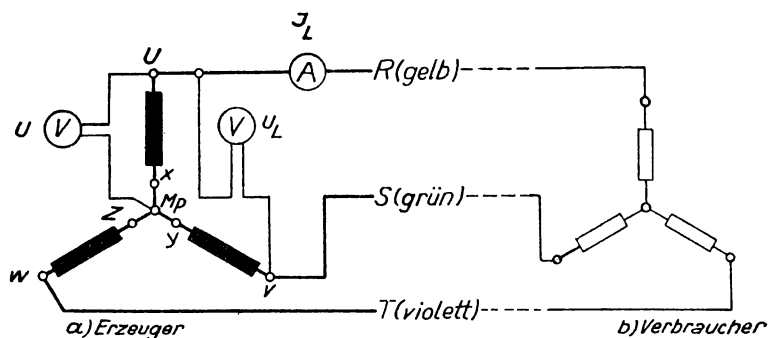


Bild 27 ab Verkettetes Dreiphasen-System (Sternschaltung)

Aus **Bild 27a** geht hervor, daß der Strom, der durch den Strang U—X fließt, gleich ist dem Strom im Außenleiter R. Dasselbe gilt auch für die anderen Stränge und Außenleiter:

Strangstromstärke
(Sternschaltung)

$$J = J_{\text{Leiter}}$$

Bei der Sternschaltung ist der im Außenleiter fließende Strom J_L gleich dem Strom im zugehörigen Strang.

Bei Sternschaltung ist bei gleichmäßig belastetem Netz die Summe der Augenblickswerte der zu- und abfließenden Ströme im Sternpunkt gleich Null.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn ungleichmäßige Belastung vorliegt. In den Außenleitern fließen dann verschiedene Ströme, die (durch die verschiedenen inneren Spannungsverluste in den Strängen) auch verschiedene Strangspannungen verursachen. Die Summe der Augenblickswerte ist dann nicht mehr Null. In einem Mp-Leiter (Mittelpunktleiter) zwischen den beiden Sternpunkten würde dann der Differenzstrom fließen (im Bild nicht dargestellt).

Betrachten Sie **Bild 27 a**, so stellen Sie fest, daß die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Mittelpunkt Mp gleich der Strangspannung ist.

Bei gleichmäßig belasteter Sternschaltung ist die Spannung zwischen Leiter und Sternpunkt — die Sternspannung — gleich der Strangspannung.

Aus **Bild 27 a** erkennen Sie weiter, daß die Spannung, gemessen zwischen den Klemmen U und V, die verkettete oder Außenleiterspannung (auch Netzspannung genannt), höher sein muß als die Sternspannung (Strangspannung).

Der sogenannte Verkettungsfaktor gibt in einem symmetrischen Mehrphasensystem an, um wieviel höher die **verkettete Spannung** als die **Sternspannung** des Systems ist. Auf die Abbildung dieses Faktors soll vorerst verzichtet werden.

Bei gleichmäßiger Belastung ist bei Sternschaltung, die Außenleiter- (verkettete oder Netz-)spannung gleich dem $\sqrt{3}$ -fachen der Strangspannung.

Bei der Verkettung der um 120° (elektrisch) verschobenen Drei-Einphasen-Wechselströme tritt die Größe $\sqrt{3}$ auf; man nennt sie den Verkettungsfaktor.

Der Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ ist das Kennzeichen des Drehstromes.

Leiterspannung
(Sternschaltung)

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U$$

Strangspannung
(Sternschaltung)

$$U = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

Das **Bild 28 ab** zeigt Ihnen die Sternschaltung mit Mittelpunktsleiter, das Drehstrom-Vierleitersystem. Die Netzspannung beträgt $1,73 \cdot 220 \text{ V} = 380 \text{ V}$. Mithin liefert das Netz zwei verschiedene Spannungen, nämlich 220 V als Sternspannung und 380 V als Netzspannung. An den drei Außenleitern (380 V) liegen (**Bild 28 b**) die Drehstrommotoren, Transformatoren usw., die eine gleichmäßige Belastung ergeben, aber auch Verbraucher, die nur an zwei Außenleitern liegen. Letztere ergeben natürlich eine ungleichmäßige Belastung, ebenso wie die Verbraucher an der Sternschaltung. Diese Verbraucher (Glühlampen, Elektrowärmegeräte und Elektrokleinwerkzeuge usw.) liegen an einem Außenleiter und dem Mittelpunktsleiter. Man nennt diese Einphasenverbraucher.

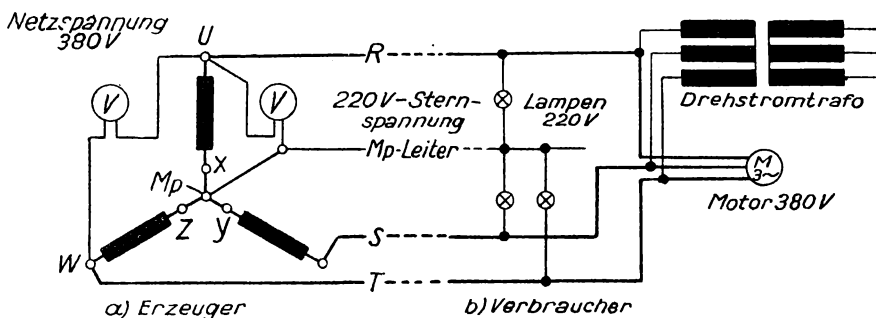


Bild 28 ab Drehstrom Vierleitersystem, Sternschaltung mit Mp-Leiter im 220/380 V-Netz

Aus den früheren Betrachtungen wissen Sie, daß man danach trachtet, durch gleichmäßige Verteilung der Belastung den Generator möglichst gleichmäßig zu beanspruchen. Im Mp-Leiter fließt der Differenzstrom, wie bereits besprochen. Die 3 Wicklungsstränge können aber auch so verbunden sein, wie es **Bild 29 ab** zeigt, und zwar bringt **Bild 29 a** wieder die Stränge des Generators, während

Bild 29 b die Schaltung der Verbraucher zeigt. Die Stränge sind in Summenreihenschaltung geschaltet. Der Endpunkt des Stranges I (X) ist mit dem Anfang des Stranges II (V), dessen Ende (Y) mit dem Anfang des Stranges III (W) und dessen Endpunkt (Z) mit dem Anfang (U) des Stranges I vereinigt. Die einfache Anordnung der Widerstände in dieser Schaltung ergibt ein Dreieck, daher der Name Dreieckschaltung.

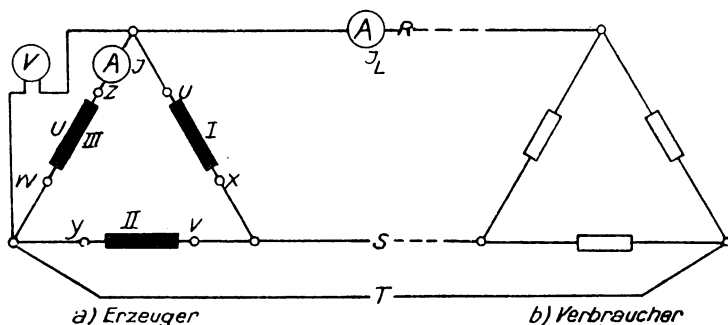


Bild 29 ab Dreieckschaltung

Die folgenden Untersuchungen der Spannungs-, Strom- und Leistungsverhältnisse gelten sowohl für Erzeuger- als auch für Verbraucherschaltungen, wie schon bei der Sternschaltung gezeigt.

Aus **Bild 29 a** ersehen Sie, daß die Außenleiterspannung $U_{RT} = U$ gleich ist der im Strang WZ erzeugten Strangspannung U .

Bei symmetrischer Belastung ist bei der Dreieckschaltung die Außenleiterspannung gleich der Strangspannung. Bei Dreieckschaltung kann keine zweite Spannung entnommen werden.

Anders liegen die Stromverhältnisse. Ohne weiteres erkennen Sie aus **Bild 29 a**, daß der im Außenleiter fließende Strom J_L vom Strangstrom J unterschiedlich sein muß, denn der Außenleiter (R) gehört ja dem Strang I und dem Strang III an. Wie sich die Stromverhältnisse unter Berücksichtigung der Verschiebung der Stränge um 120° gestalten, zeigt das **Bild 30**.

Wir finden im **Bild 30** ein gleichseitiges Dreieck mit den wahllos gewählten Seitenlängen von 6 cm.

Man nennt diese Art Darstellung ein Diagramm (Streckendiagramm der Ströme).

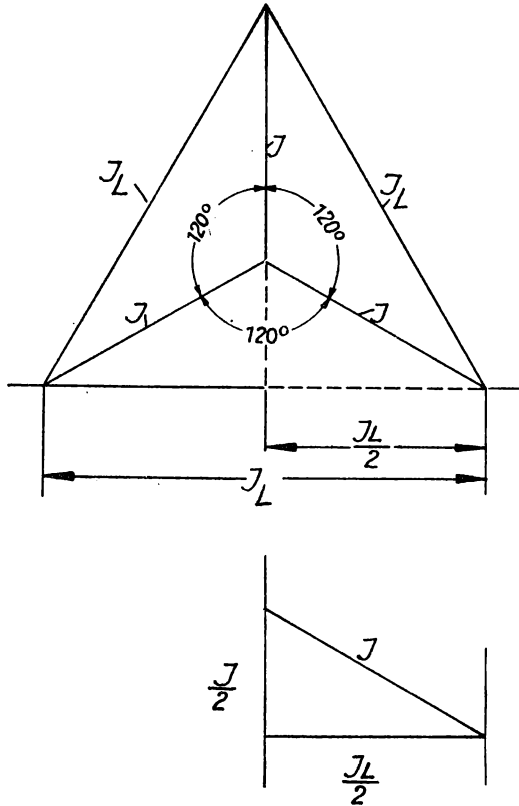


Bild 30 Streckendiagramm der Ströme bei Dreieckschaltung

Aus Bild 30 unten folgt

$$J^2 = \left(\frac{J_L}{2}\right)^2 + \left(\frac{J}{2}\right)^2$$

$$\frac{J_L}{2} = J^2 - \left(\frac{J_L}{2}\right)^2$$

$$\frac{J_L}{2} = \sqrt{\frac{4J^2 - J_L^2}{4}} = \sqrt{\frac{3J^2}{4}}$$

$$\frac{J_L}{2} = \frac{J}{2} \cdot \sqrt{3} \qquad J_L = \sqrt{3} \cdot J$$

daraus folgt:

Leiterstromstärke
(Dreieck)

$$J_L = \sqrt{3} \cdot J$$

Strangstromstärke
(Dreieck)

$$J = \frac{J_L}{\sqrt{3}}$$

Bei Dreieckschaltung und gleichmäßiger Belastung ist der Netzstrom gleich dem $\sqrt{3}$ -fachen des Strangstromes.

Zusammenfassung

Der am häufigsten auftretende mehrphasige Wechselstrom ist der Dreiphasenstrom oder Drehstrom. Seine Vorteile sind Ersparnis von Leitungsmaterial und bessere Maschinenausnutzung. Die beiden Verkettungsarten sind die Sternschaltung und die Dreieckschaltung. Die abgeleiteten Strom-Spannungsbeziehungen gelten nur für symmetrische Belastung, d. h. die angeschlossenen Verbraucher (Widerstände) sind je gleichgroß. Um gleiche Spannungen beizubehalten, muß bei ungleicher Belastung in Sternschaltung der Mittelpunktsteiter mitgeführt werden, bei der Dreieckschaltung ändern sich bei ungleicher Belastung die Spannungen nicht, es treten lediglich verschiedene Ströme in den Leitungen auf.

3.6.3. Leistung. Ihnen ist bekannt, daß die Wirkleistung des Einphasen-Wechselstroms errechnet wird nach der allgemeinen Leistungsformel für Wechselstrom

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

Wenn der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$, d. h., wenn Strom und Spannung in Phase liegen, dann geht die obige Formel über in die Ihnen vom Gleichstrom her bekannte Gleichung

$$P = U \cdot J$$

Es kann nur dann $\cos \varphi = 1$ sein, wenn ohmsche Widerstände im Wechselstromkreis liegen oder wenn eine positive Phasenverschiebung, hervorgerufen durch Spulen oder Wicklungen, durch eine negative Phasenverschiebung, durch Kapazitäten, Kondensatoren aufgehoben oder kompensiert wird. U und J sind die Ablesungen an den Instrumenten, also Effektivwerte von Spannung und Strom. Die folgenden Ausführungen über die Ermittlung der Leistung bei Drehstrom müssen wir auf die Schaltarten Stern und Dreieck beziehen. Bei der Sternschaltung gilt, daß die dem Netz entnommene Leistung gleich der Summe der Leistungen der drei Einzelverbraucher ist. Vergleichen Sie mit **Bild 27 ab.**

Bei symmetrischer Belastung finden wir:

$$\text{Gesamtleistung} = 3 \cdot \text{Strangleistung}$$

Gesamtleistung

$$P_{\text{ges}} = 3 \cdot P_{\text{Strang}}$$

da aber $P = U \cdot J$ ergibt sich: $P_{\text{ges}} = 3 \cdot U \cdot J$

Weil aber meist Phasenverschiebung im Netz vorliegt, kann man für die **Gesamtleistung** des Dreiphasensystems auch schreiben:

Gesamtleistung
des Netzes

$$P_{\text{ges}} = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi$$

In dieser Formel sind, je nachdem ob Sternschaltung oder Dreieckschaltung vorliegt, die entsprechenden Werte für U und J einzusetzen.

Dabei ist zu beachten:

Sternschaltung	Dreieckschaltung
$U = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ $J = J_L$	$U = U_L$ $J = \frac{J_L}{\sqrt{3}}$

Auf Grund dieser Beziehungen erhält man für die Leistung

Sternschaltung	Dreieckschaltung
$P = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi$ $P = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot J_L \cdot \cos \varphi$ <p>und durch rationalmachen des Nenners erhält man:</p> $P = 3 \cdot \frac{U_L \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} \cdot J_L \cdot \cos \varphi$ <p>und durch Kürzen ergibt sich:</p> $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \cos \varphi$	$P = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi$ $P = 3 \cdot U_L \cdot \frac{J_L}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$ $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \cos \varphi$

Aus der Übereinstimmung der beiden Gleichungen ergibt sich, daß die **Leistung** des Dreiphasensystems unabhängig davon ist, ob Stern- oder Dreieckschaltung vorliegt.

In ähnlicher Weise wie beim Wechselstrom verhalten sich Blind- und Scheinleistung, jedoch ist der Verkettungsfaktor in die Formel einzufügen.

Blindleistung
des Drehstroms

$$P_b = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \sin \varphi$$

Scheinleistung
des Drehstroms

$$P_s = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L$$

Beispiel:

Ein Drehstrommotor in **Sternschaltung** gibt bei einer Leiterspannung von 380 V eine mechanische Leistung von 12,85 PS ab, sein Wirkungsgrad $\eta = 0,85$ und der $\cos \varphi = 0,82$.

Zu berechnen sind:

- Strangspannung
- Wirkleistung
- Leiterstrom
- Strangstrom
- Scheinleistung

Lösung:

a) Sternspannung:

Für Sternspannung gilt:

$$U = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

$$U = \frac{380 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

b) Wirkleistung:

Die abgegebene mechanische Leistung wird in elektrische umgerechnet:
(1 PS = 736 W)

$$12,85 \cdot 736 = 9457,6 \text{ W} = 9,45 \text{ kW},$$

$$\text{da aber } \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \text{ ergibt sich}$$

$$P_{zu} = P_w = \frac{9,45}{0,85} \approx 11 \text{ kW}$$

Die Wirkleistung beträgt $\approx 11 \text{ kW}$

c) Leiterstrom:

$$P_w = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \cos \varphi$$

$$J_L = \frac{P_w}{U_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}$$

$$J_L = \frac{11000 \text{ W}}{380 \text{ V} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,82}$$

$$J_L = 20 \text{ A}$$

d) Es gilt $J_L = J$

e) Scheinleistung:

$$P_s = U_L \cdot J_L \cdot \sqrt{3} = 380 \text{ V} \cdot 20 \text{ A} \cdot 1,73$$

$$P_s \approx 13,1 \text{ kVA}$$

Zusammenfassung

Eine Zusammenschaltung mehrerer Einphasensysteme nennt man ein **Mehrphasensystem**. Die einzelnen Wechselspannungen sind gegeneinander um **bestimmte**, gleich große Winkel phasenverschoben.

Das einfachste Mehrphasensystem ist das Zweiphasensystem. Es besteht aus zwei um 90° gegeneinander verschobenen gleichen Einphasen-Wechselspannungen. Es hat für die Energieübertragung praktisch keine Bedeutung gefunden, jedoch in der Steuer-, Meß- und Regeltechnik. Von größter Bedeutung in der gesamten Starkstromtechnik ist das Dreiphasensystem, das auch Drehstromsystem genannt wird. Es enthält drei zeitlich um 120° gegeneinander verschobene Wechselspannungen, die in Drehstromgeneratoren erzeugt werden. Diese enthalten drei entsprechend räumlich versetzte Wicklungsstränge.

Die drei Wicklungsstränge des Dreiphasengenerators werden miteinander entweder in Stern oder in Dreieck verkettet.

So wie die Generatoren können auch die Verbraucher in Stern oder in Dreieck geschaltet werden.

Bei Sternschaltung ist ein vierter Leiter, der Mittel- oder Sternpunktleiter erforderlich, wenn die Stränge nicht gleichmäßig belastet werden. In diesem fließt die Summe der drei Leiterströme. Sind diese gleich groß, dann ist ihre Summe gleich Null.

Die Leistung des Dreiphasenstromes ist gleich der Summe der Einzelleistungen der drei Stränge. Bei gleicher Belastung der Stränge ist die Leistung:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \cos \varphi$$

und unabhängig von der Schaltung.

Übungen :

21. Was versteht man unter einem Mehrphasensystem?
22. Wie groß sind die Phasenunterschiede der Strangspannungen im Zweiphasen- und im Dreiphasensystem?
23. Was versteht man unter einem verketteten Dreiphasensystem?
24. Wie groß ist die Leiterstromstärke bei einem Drehstrommotor von 10 kW bei 380 V, $\cos \varphi = 0,85$ und $\eta = 0,85$?
25. Welche Beziehungen bestehen zwischen den Strömen und den Spannungen in den beiden Schaltungen?
26. Wie groß ist der Strom im Mittelleiter bei symmetrischer Belastung?
27. Wie bestimmt man die Leistung eines Dreiphasenstromes
 - a) bei gleicher Stranglast,
 - b) bei ungleicher Stranglast?

3.7. Drehfeld und Drehstrommotoren

3.7.1. Entstehung des Drehfeldes. In Bild 31 sehen wir drei Spulenpaare, die von einem Dreiphasenstrom durchflossen werden sollen, so angeordnet, daß man den Verlauf des Magnetfeldes deutlicher erkennen kann. Außerdem denken Sie sich das Polrad durch eine leichte Magnetnadel ersetzt, die sich mithin leicht und rasch in die Richtung des Magnetfeldes einstellen kann. Beachten Sie auch hier wieder die Lage der Anfänge A und der Enden E der Wicklungsstränge und den Wicklungssinn. Der Wicklungsstrang des Spulenpaares A_2E_2 wird z. B. erhalten, wenn man das Spulenpaar A_1E_1 um 120° dreht. Dasselbe gilt auch für das Spulenpaar A_3E_3 . Fließen nun durch die Spulenpaare die Ströme eines Dreiphasensystems, dann erzeugen diese Ströme nacheinander Magnetfelder. Betrachten Sie das Bild 31 b. Im Moment I (bei 90°) hat der Strom im Spulenpaar A_1E_1 sein positives Maximum und mithin auch das von ihm erzeugte Magnetfeld R. (Als positiv wollen wir den Strom bezeichnen, der in den Anfang A_1 der Spule hineinfließt.) Gleichzeitig erhalten die Spulen A_2E_2 und A_3E_3 je einen negativen Strom von dem halben Höchstwert, deren Magnetfelder durch die Pfeile S und T dargestellt sind. Diese Teilfelder resultieren zu einem Hauptfeld in der Richtung R. Im Moment II hat der Strang T sein negatives Maximum, während die Stränge R und S nur den halben positiven Höchstwert des Stromes führen. Die von diesen Strömen erzeugten Magnetfelder sind in Bild 31 c dargestellt. Sie erkennen daraus, daß sich das Hauptfeld um 60° in die Richtung T gedreht hat. Zeichnen Sie sich die Stromrichtungen des Momentes III ein, in welchem Strang S im Spulenpaar A_2E_2 das positive Maximum des Stromes hat, dann finden Sie eine weitere Drehung des Hauptfeldes um 60° (Bild 31 c). Daraus ergibt sich folgender Satz:

Ein Dreiphasenstrom ist in der Lage, ein magnetisches Drehfeld zu erzeugen. Aus diesem Grunde bezeichnet man den Dreiphasenstrom auch als Drehstrom. Eine in dem Drehfeld befindliche Magnetnadel macht diese Drehung mit. Diese Tatsache ist von besonderer Wichtigkeit, da sich darauf die Konstruktion der Drehstrommotoren stützt.

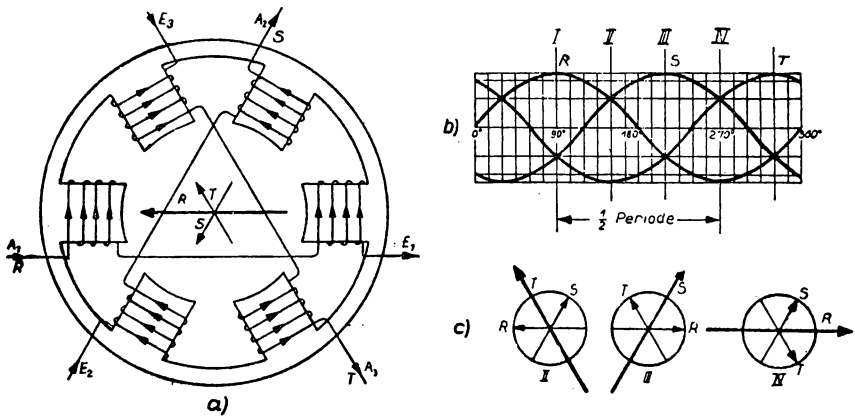


Bild 31 abc Drehfeld mit Liniendiagramm und resultierendes Hauptfeld

Sie erkennen weiter, daß das Magnetfeld der zweipoligen Wicklung (2 Pole = 1 Polpaar) während einer Periode eine Umdrehung macht. Es ist leicht zu erkennen, daß bei einer vierpoligen Wicklung (2 Polpaare) während einer Periode nur eine halbe Umdrehung und bei einer sechspoligen Wicklung (3 Polpaare) eine drittel Umdrehung zustande kommt. Es ist also die Drehzahl des Drehfeldes gleich der Frequenz f dividiert durch die Zahl der Polpaare p , also $n = f/p$. Als zugeschnittene Größengleichung

$$\text{Drehzahl} \quad \boxed{n/\text{min}^{-1} = \frac{60 \cdot f/\text{Hz}}{p}}$$

Diese Drehzahl nennt man die synchrone Drehzahl.

3.7.2. Synchronmotoren. Bringt man statt einer leichten Magnetnadel ein schweres Polrad in das Drehfeld, dann kann dieses infolge seiner Trägheit dem Felde nicht sofort folgen, es kann mithin ein Drehstromgenerator nicht ohne weiteres als Drehstrommotor verwendet werden, wie das z. B. bei Gleichstrom der Fall ist.

Wenn man aber vor dem Einschalten der Statorwicklung das Polrad durch eine äußere Antriebskraft so in Umdrehung versetzt, daß seine Drehzahl gleich der des Drehfeldes wird, dann läuft das Polrad nach Einschalten der Wicklung unter dem Einfluß des Drehfeldes mit synchroner Drehzahl weiter und kann mechanische Arbeit abgeben. Man nennt derartige Motoren Synchronmotoren. Das Charakteristische dieser Motoren ist mithin, daß sie vor dem Einschalten synchronisiert, d. h. durch eine besondere Antriebsmaschine oder auf eine andere Art auf die synchrone Drehzahl angeworfen werden müssen. Als Anlaßmaschine kann z. B. die Erregermaschine verwendet werden, die zum Antrieb des Erregergleichstromes für das Polrad erforderlich ist. Es muß natürlich dann die passende Gleichspannung vorhanden sein. Die Leistung der Erregermaschine beträgt aber nur wenige Prozent der Leistung des Motors. Deshalb muß der Anlauf des Synchronmotors immer bei Leerlauf erfolgen.

3.7.3. Asynchronmotoren. Bringt man in das Drehfeld eine kurzgeschlossene Drahtschleife, die um die Achse des Drehfeldes drehbar gelagert ist, dann induziert das Drehfeld in der stillstehenden Schleife nach dem Induktionsgesetz einen Strom, dessen Richtung Sie bestimmen können. Nun haben Sie weiter in Lehrbrief 2 gelesen, daß auf einen Stromleiter im Magnetfeld eine Kraft ausgeübt wird, deren Richtung mit der Drehrichtung des Feldes übereinstimmt. Das Drehfeld hat mithin das Bestreben, die kurzgeschlossene Schleife mitzunehmen. Ist diese frei drehbar, dann beginnt sie sich zu drehen. Mit zunehmender Drehzahl der Schleife wird aber die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Schleife immer kleiner, damit auch der induzierte Strom und das Drehmoment der Schleife. Wären keine mechanischen Widerstände (Lager- und Luftreibung) vorhanden, so daß auch kein Drehmoment erforderlich ist, um die Schleife in Bewegung zu erhalten, dann würde ihre Drehzahl so lange steigen, bis sie gleich der synchronen Drehzahl des Feldes wäre. Dann gäbe es auch keine Relativbewegung mehr zwischen dem Drehfeld und der Schleife, es würde keine Uspannung mehr induziert werden, Strom und Drehmoment wären gleich Null.

Da aber immer mechanische Widerstände vorhanden sind, wird die Drehzahl der Schleife nur so lange zunehmen, bis Gleichgewicht zwischen dem elektrischen Drehmoment und dem mechanischen Gegendrehmoment herrscht. Die Drehzahl der Schleife ist mithin immer kleiner als die synchrone Drehzahl, sie läuft asynchron. Die nach diesem Prinzip aufgebauten Motoren nennt man daher Asynchronmotoren. Das Zurückbleiben der Drehzahl n_s der Schleife gegen der des Drehfeldes ist die Schlüpfung s . Sie wird in Prozenten der synchronen Drehzahl n ausgedrückt.

Schlupf

$$s = \frac{n - n_s}{n}$$

Der Läufer ist an seinem Umfang mit Löchern versehen. Diese Löcher (Nuten) werden wie beim Ständer gestanzt. In diesen Löchern liegen Stäbe aus Kupfer oder Aluminium. Sämtliche Stäbe sind sowohl an der einen als auch an der anderen Stirnseite durch Ringe (Kurzschlußringe) untereinander verbunden. Dadurch entsteht eine in sich kurzgeschlossene Stabwicklung. Für sich allein be-

trachtet hat, diese Wicklung die Form eines Käfigs (Bild 32). Sie wird infolgedessen auch **Käfigwicklung** genannt. Weil der Läufer eine kurzgeschlossene Wicklung besitzt, ist die Bezeichnung: Kurzschlußläufer oder Kurzschlußanker allgemein üblich. Ein Motor mit Kurzschlußläufer hat außer den Lagern keine Teile, die einem Verschleiß unterworfen sind. Er ist daher der einfachste, dauerhafteste und billigste Motor.

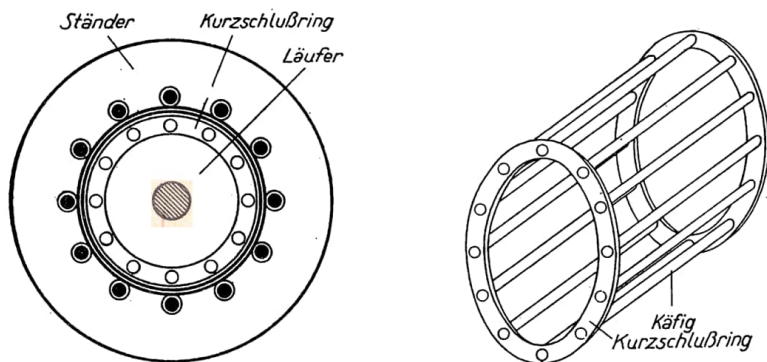


Bild 32 Läufer mit Käfigwicklung

Der Kurzschlußkäfig besteht aus blanken Stählen, die in die Läufernuten eingeschoben und durch Kurzschlußringe beiderseitig verbunden sind. Bei kleinen und mittleren Leistungen wird dieser Käfig im Druckguß- oder Schleudergußverfahren in die Läufernuten gegossen (Bild 33), die Kurzschlußringe können dabei gleich mit angegossenen Lüfterflügeln versehen werden. Das Leitermaterial ist in diesem Falle Aluminium oder eine Aluminiumlegierung. Nur wenn starke Korrosionsgefahr für den Aluminiumkäfig besteht, z. B. auf Schiffen (Einwirkung des Seewassers), werden auch bei kleinen Leistungen zum Aufbau

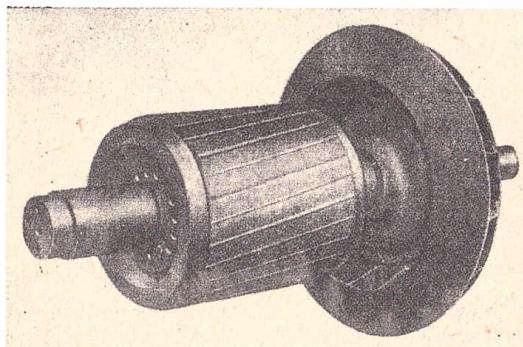


Bild 33 Kurzschlußläufer mit Käfig aus Aluminium-Schleuderguß

des Läuferkäfigs Rund- oder Profilstäbe aus Kupfer verwendet, die Kurzschlußringe werden durch Hartlötung mit den Stäben verbunden (Bild 34).

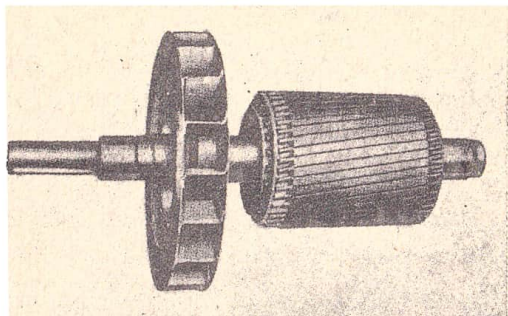


Bild 34 Drehstrom-Doppelnutenläufer

3.7.4. Anlassen von Kurzschlußmotoren. Wird der Motor eingeschaltet, dann steht im ersten Augenblick der Läufer noch still, während sich das Drehfeld mit der synchronen Drehzahl dreht. Die Schnittgeschwindigkeit des Drehfeldes ist in diesem Augenblick gleich seiner Drehgeschwindigkeit. Infolge dieser hohen Schnittgeschwindigkeit der Kraftlinien entsteht in der Läuferwicklung eine hohe Spannung, die infolge des geringen Widerstandes der Läuferwicklung in dieser Wicklung einen sehr starken Induktionsstrom (Kurzschluß) erzeugt. Dieser Strom erzeugt im Läufer ein magnetisches Feld, das dem magnetischen Feld des Ständers entgegenwirkt, wodurch dessen Kraftwirkung auf den Läuferstrom erheblich geschwächt wird. Das Anlaufmoment eines solchen Motors ist daher trotz des sehr hohen Anlaufstromes verhältnismäßig gering.

Durch den hohen Anlaufstrom entstehen im Leitungsnetz starke Stromstöße, die erhebliche Spannungsschwankungen bewirken. Die Folge dieser Spannungsschwankungen ist, daß die Helligkeit der an dasselbe Netz angeschlossenen Glühlampen ebenfalls stark schwankt, was besonders dann sehr störend wirkt, wenn das Anlassen des Motors häufiger erfolgt.

An öffentliche Elektrizitätswerke dürfen infolgedessen im allgemeinen nur Kurzschlußmotoren bis zu Leistungen von 4 kW angeschlossen werden, wenn das Anlassen mittels Stern dreieckschalters erfolgt.

Das Anlassen von Kurzschlußmotoren kann erfolgen a) durch direktes Einschalten, b) mittels Stern dreieckschalters, c) durch Ständeranlasser, d) durch Anlaßumspanner, e) durch Fliehkraftriemenscheiben oder -kupplungen, die auch mechanische Anlasser heißen.

Bei Drehstrom-Kurzschlußmotoren bis einschließlich 1,1 kW Nennleistung sind Anlaßschalter ohne Anlaßstufe an Stelle eines Anlassers zulässig. Die im Augenblick des Einschaltens auftretende Stromstärke ist bei diesen kleinen Motoren etwa 6mal so hoch wie der Nennstrom.

Flinke Sicherungen sind für den 2,5fachen Nennstrom zu bemessen. Flinke Sicherungen für den Nennstrom würden infolge des hohen Anlaufstromes bei längerer Anlaufzeit während des Anlaufs durchschmelzen. Bei Verwendung von trägen Sicherungen genügen Sicherungen für die Nennstromstärke.

Stärkere Motoren werden mittels Sterndreieckschalters angelassen. Die Ständerwicklung eines Drehstrommotors wird entweder in Stern oder in Dreieck geschaltet. Die erforderliche Sternspannung ist $\frac{1}{\sqrt{3}}$ oder 1,73mal so hoch wie die Dreieckspannung. Infolgedessen läßt sich jeder Drehstrommotor für zwei verschiedene Spannungen verwenden. Ein Motor für 220 V Dreieckspannung kann mit $220 \text{ V} \cdot 1,73 = 380 \text{ V}$ Sternspannung betrieben werden. Ebenso läßt sich ein

Motor für 190 V Sternspannung bei $\frac{190 \text{ V}}{1,73}$ Dreieckspannung verwenden. Leistung und Drehzahl sind bei Stern- und Dreieckschaltung gleich hoch.

Das Umschalten von Dreieck in Stern und umgekehrt erfolgt im allgemeinen am Klemmbrett des Motors durch Umklemmen der Verbindungen zwischen den einzelnen Anschlußklemmen. Um Irrtümer nach Möglichkeit zu vermeiden, sind auf dem Klemmbrett die Anfänge der drei Phasenwicklungen in der Reihenfolge U, V, W und deren Enden in der Reihenfolge Z, X, Y angeordnet. Bei der Sternschaltung sind die drei nebeneinanderliegenden Klemmen Z, X, Y (oder U, V, W) miteinander zu verbinden. An die drei freien Klemmen werden die drei Netzleitungen R, S, T angeschlossen. Um die Ständerwicklung in Dreieck umzuschalten, ist erst die Verbindung zwischen den drei nebeneinanderliegenden Klemmen zu entfernen. Dann sind je zwei übereinanderliegende Klemmen (U mit Z, V mit X, W mit Y) zu verbinden. Die drei Netzleitungen R, S, T können entweder an die nebeneinanderliegenden Klemmen U, V, W oder Z, X, Y angeschlossen werden (Bild 35).

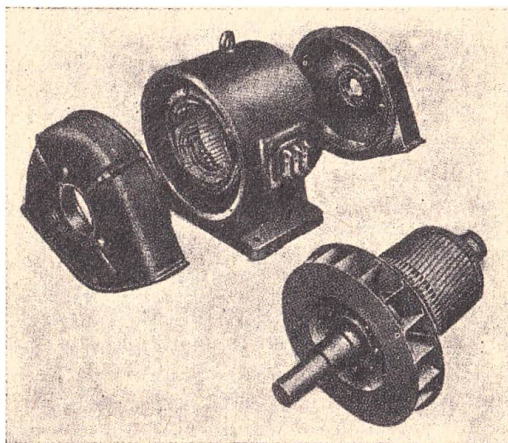


Bild 35 Bestandteile eines Doppelnutmotors, Klemmbrett für Dreieck geschaltet

Um den hohen Anlaufstrom bei Kurzschlußmotoren herabzudrücken, schaltet man die Ständerwicklung während des Anlaufs in Stern. Sobald der Motor seine Nenndrehzahl erreicht hat, wird die Ständerwicklung in Dreieck umgeschaltet. Beim Anlauf ist die Phasenspannung der Ständerwicklung 1,73mal so klein wie im Betrieb. Infolge dieser geringeren Phasenspannung und der Schaltung der Phasen in Stern sinkt die Anlaufstromstärke in den Zuleitungen zum Motor auf $\frac{1}{3}$ derjenigen bei Dreieckschaltung. Sie ist infolgedessen nur noch 1,5 bis 2mal so hoch wie die Nennstromstärke. Daher sind flinke Sicherungen mindestens für den 2fachen Nennstrom zu bemessen. Träge Sicherungen dagegen für den Nennstrom.

Bei Verwendung von Sterndreieckschaltern ist das Anlaufmoment des Motors gering.

Sie können infolgedessen nur für Anlauf ohne oder mit geringer Last Verwendung finden.

In Bild 36 ist der grundsätzliche Schaltplan eines Motors mit Sterndreieckschalter angegeben. Bild 37 zeigt die Schaltung bei Verwendung eines Sterndreieckschalters in Walzenform für nur eine Drehrichtung.

Bei der Auswahl der Motoren für Sterndreieckschaltung ist darauf zu achten, daß die Motoren für eine Sternspannung gewickelt sein müssen, die 1,73mal so hoch wie die zur Verfügung stehende Betriebsspannung ist. Für eine Betriebsspannung von 110 V ist ein Motor für 110/190 V, für 220 V Betriebsspannung ein Motor für 220/380 V und für 380 V Betriebsspannung ein Motor für 380/660 V zu nehmen.

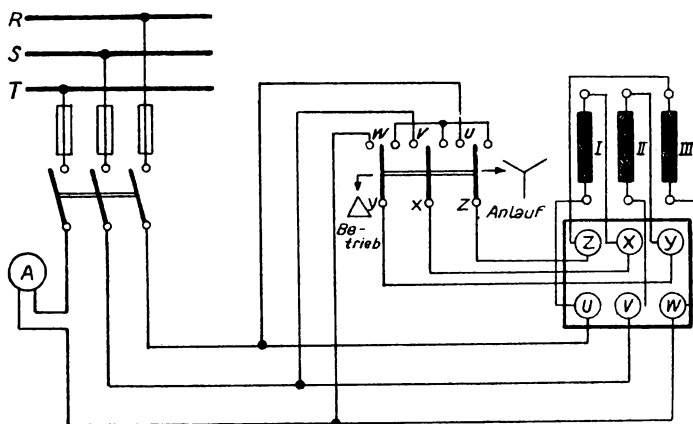


Bild 36 Anlassen mittels Stern-Dreieck-Schalters

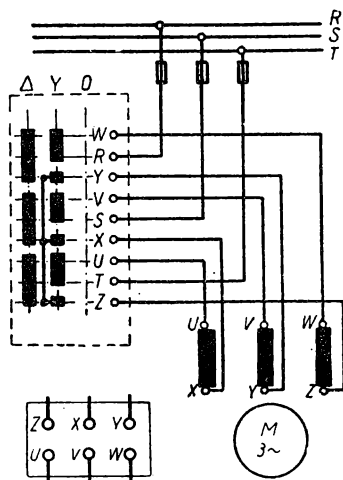


Bild 37 Stern-Dreieck-Walzenschalter

Zusammenfassung

Der Drehstrom hat seine Bedeutung durch die Drehstrommotoren erhalten. Der Name Drehstrom entstand dadurch, weil in einem mit Dreiphasenstrom gespeisten Spulensystem ein magnetisches Drehfeld zustande kommt. Diese Erscheinung führte zur Konstruktion des Drehstrommotors. Bringt man eine um die Achse des Drehfeldes gelagerte kurzgeschlossene Windung in ein Drehfeld, dann erzeugt dieses in der Windung Induktionsströme, deren Kraftwirkungen die Mitnahme der Windung in der Drehrichtung des Feldes bewirken. Die Drehzahl des Feldes ist von der Polzahl und der Frequenz nach der Formel $n = f/p$ abhängig. Der Rotor erreicht diese Drehzahl nie, sondern bleibt immer um den Schlupf zurück, der erforderlich ist, den zur Erzeugung des Drehmomentes erforderlichen Strom zu induzieren. Die Drehzahl des Rotors stellt sich auf jenen Wert ein, bei welchem Gleichgewicht zwischen dem elektrischen Drehmoment und dem mechanischen Gegendrehmoment herrscht. Die Schlüpfung ist mithin um so größer, je größer die Belastung ist. Weil die Drehzahl des Rotors immer kleiner als die des Drehfeldes ist, entstand die Bezeichnung Asynchronmotor.

Ein Synchronmotor hat als Rotor ein Magnetrad, dessen Pole durch einen besonderen Erregergleichstrom erregt werden. Seine Drehzahl ist gleich der des Drehfeldes, er läuft synchron. Das Anlassen des Synchronmotors erfolgt mit einer besonderen Anlaßmaschine, durch die das Polrad erst auf die synchrone Drehzahl gebracht wird. Erst wenn der Synchronismus erreicht ist, kann die Statorwicklung an das Drehstromnetz angeschlossen werden.

Übungen :

28. In einem elektrischen Ofen sollen stündlich 20 000 kcal Wärme erzeugt werden. Dazu werden drei Heizkörper an das Dreiphasennetz ($3 \times 220 \text{ V}$) angeschlossen.
- Wie groß sind die Ströme in den einzelnen Leitern?
 - Wie groß müssen die Widerstände bei Sternschaltung und bei Dreieckschaltung sein?
29. Erklären Sie die Entstehung eines Drehfeldes!
30. Wie wird die Drehzahl des Drehfeldes berechnet?
31. Wie kommt das Drehmoment des Rotors im Drehfeld zustande?
32. Was versteht man unter Schlüpfung und wie wird sie berechnet?
33. Wodurch unterscheidet sich der Synchronmotor vom Asynchronmotor?
34. Warum finden Synchronmotoren als Antriebsmaschinen nur selten Verwendung?

3.8. Transformator

Auf den beiden Schenkeln eines geschlossenen Eisenkreises befinden sich zwei Wicklungen angeordnet. Die Primärwicklung mit w_1 Windungen liegt an einer Wechselspannungsquelle, die Sekundärwicklung mit w_2 Windungen sei zunächst offen. Der vom Primärstrom J_1 erzeugte Fluß schließt sich über den Eisenweg (geringer magnetischer Widerstand) und durchsetzt dabei die Windungen w_2 und w_1 . Der Fluß erzeugt in der Sekundärwicklung eine Urspannung E_2 und in der Primärwicklung eine Urspannung E_1 , die der angelegten Wechselspannung entgegengerichtet ist. (Fertigen Sie sich selbst eine Skizze an!)

Die Sekundärspannung E_2 steht zu unserer Verfügung, wir können sie irgendeinem Verbraucher zuführen. Mit Hilfe eines Transformators ist es also möglich, eine Wechselspannung in eine beliebig höhere oder niedrigere Wechselspannung umzuwandeln, wenn man das Windungsverhältnis (Übersetzungsverhältnis) gleich dem gewünschten Spannungsverhältnis macht.

Belastet man den Transformator, d. h. schließt man einen Verbraucher an die Sekundärwicklung, so fließt ein Sekundärstrom J_2 . Der Transformator liefert also an den Verbraucher eine Leistung.

Die Nennleistung eines Transformators ist die Scheinleistung. Sie wird in VA (Voltampere) bzw. kVA oder MVA angegeben.

Hinsichtlich der Bewicklung unterscheidet man hauptsächlich den Kerntrafo und den Manteltrafo.

Zum Herabsetzen der Wirbelströme (Verluste) wird der Eisenkörper aus Blechen (Dynamoblech) von 0,35 mm bis 1,5 mm Stärke zusammengebaut.

Um wahlweise verschiedene Spannungen anschließen zu können, werden die Wicklungen mit Anzapfungen ausgeführt.

Schwachstromtrafos (Übertrager) sind relativ klein. Sie werden hauptsächlich zur Anpassung eines beliebigen Verbrauchers an den inneren Widerstand eines Wechselstromgenerators verwendet (maximale Leistungsentnahme).

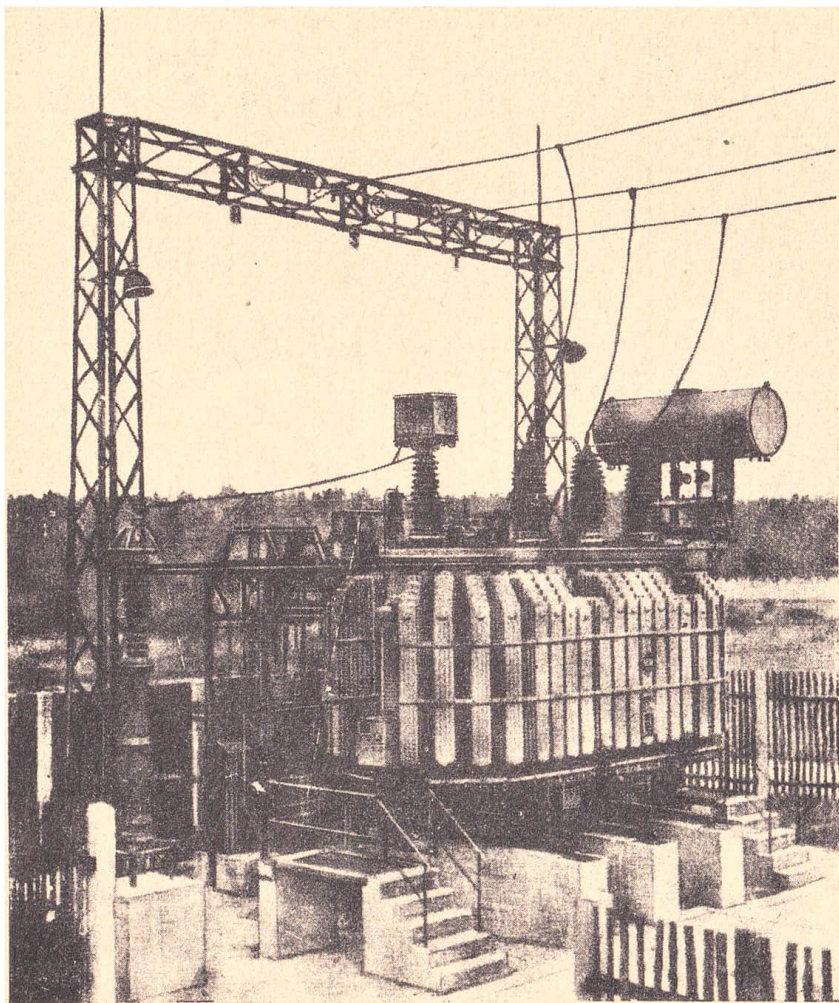


Bild 38 Drehstrom-Öltransformator für eine Nennleistung von 31,5 MVA
mit Ölausdehnungsgefäß und Kaskadenwandler

Transformatoren größerer Leistung (Umspanner) werden zum Auf- und Abspannen der von den Kraftwerken erzeugten Spannungen verwendet. Größere Kraftwerke (Generatoren) liefern in der Regel eine Spannung von 10 kV 50 Hz. Für öffentliche Zwecke (Hausinstallation: Licht, Kraft) wird auf 220/380 V abgespannt. Für die Weitübertragung (500, 1000 oder 2000 km) wird bis zu 400 kV (220/380 kV) aufgespannt. Um die Leistungsverluste klein zu halten, überträgt man die Energie mit hoher Spannung und kleinem Strom.

Transformatoren größerer Leistungen besitzen auch größere bauliche Abmaße. Sie liegen in der Größenordnung von Metern bei übertragenen Leistungen von über 10 MVA. Ein besonderes Problem bildet bei der Übertragung derartig großer Leistungen die Abführung der in Form von Wärme auftretenden Verlustleistung. Bei kleineren Transformatoren wird die Verlustwärme durch die umgebende Luft abgeführt. Bei Transformatoren mittlerer Leistung ist dies nicht mehr möglich. Sie werden in einen Kessel mit Öl eingebaut (**Bild 38**). Der Kessel ist von Kühlrippen umgeben.

Infolge von Temperaturströmung wird die Wärme durch das Öl auf die Blechwand übertragen. Diese geben ihrerseits die Wärme auf Grund ihrer großen Oberfläche (Kühlrippen) leicht nach außen ab. Bei Transformatoren hoher Spannung dient das Öl auch noch zur Erhöhung der Isolationsfestigkeit. Die Kühlung größerer Transformatoren erfolgt durch Fremdlüftung. Beachten Sie das Fahrgestell. Die vier Gleisrollen sind für Längs- und Querfahrt umsteckbar. Zur Messung hoher Spannungen und Ströme mit üblichen Instrumenten (100 V bzw. 5 A) benützt man Transformatoren.

Man bezeichnet derartige Transformatoren als Meßwandler (**Bild 39**),

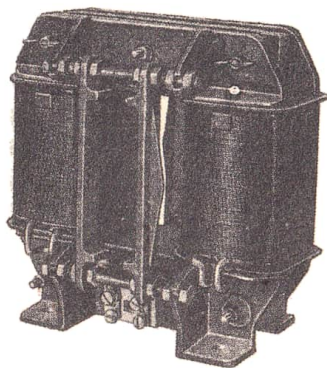


Bild 39 Stromwandler mit aufklappbarer Anordnung des oberen Joches zwecks Montage über bereits verlegte Stromleiter

Hohe Spannungsspitzen erzielt man auf einfache Weise dadurch, daß man die Primärwicklung eines Trafos mit einem sich ruckartig ändernden Gleichstrom speist.

Die entstehenden Spannungsspitzen werden durch die Sekundärwicklung hochtransformiert. Die Schaltung dieses Trafos benützt man im Funkeninduktor und bei der Zündung (Zündspule) im Kraftfahrzeug. Statt eines Schalters verwendet man häufig einen Selbstunterbrecher (siehe Lehrbrief 2, Zündanlage). Den Drehstrom, der aus drei miteinander verketteten Wechselströmen besteht, kann man durch drei voneinander getrennte, gleichartige Einphasen-Wechselstrom-Transformatoren umspannen, wenn man deren Primär- und Sekundärwicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung miteinander verbindet (**Bild 40**).

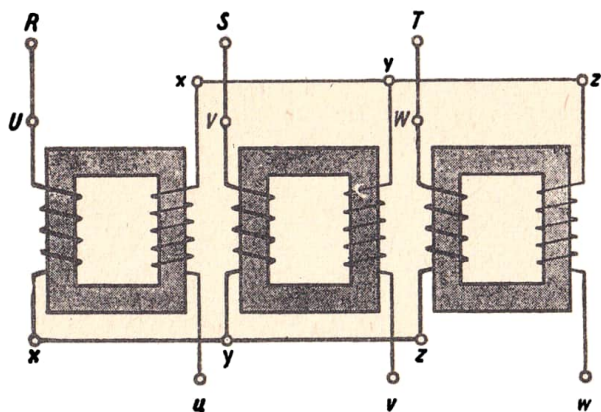


Bild 40 Umspannen von Drehstrom durch drei Einphasen-Wechselstrom-Transformatoren (Prinzipiskizze)

Denkt man sich in den einzelnen Transformatoren die Primär- und Sekundärwicklung auf den gleichen Schenkel übereinandergewickelt, dann könnte man die Transformatoren so aufstellen, daß ihre wicklungsfreien Schenkel zusammenstoßen (**Bild 41**).

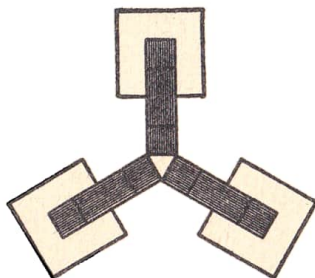


Bild 41 Entwicklung des Drehstromtransformators

In diesem gemeinsamen Schenkel vereinigen sich die Magnetfelder der drei bewickelten Schenkel. Ebenso, wie bei der Sternschaltung der Phasen die Summe der Stromstärken in jedem Augenblick im Sternpunkt Null ist, ist auch die Summe der Magnetflüsse in jedem Augenblick in dem gemeinsamen Schenkel Null. Dieser unbewickelte Schenkel ist deshalb entbehrlich. Rückt man die drei bewickelten Schenkel in dieselbe Vertikalebene, so erhält man den gebräuchlichen Drehstromtransformator nach Bild 42.

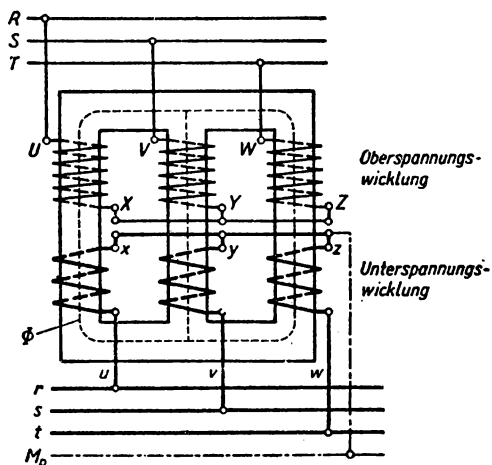


Bild 42 Drehstromtransformator (Sternschaltung)

Bild 43 zeigt das vereinfachte Schaltzeichen des Drehstromtransformators.

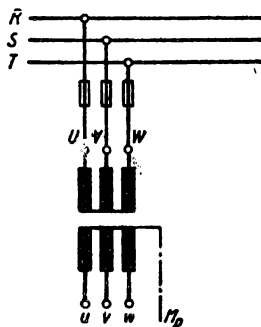


Bild 43 Schaltbild des Drehstromtransformators mit Mittelpunktsleiter

Zusammenfassung

Das Anwendungsgebiet des Transformators erstreckt sich von der Fernmelde-technik bis zur Höchstspannungstechnik, d. h. die Grenzen sind gegeben durch die Frequenz einerseits und die Spannungshöhe andererseits.

Wicklungsanordnung und Form richten sich nach Spannung und Stromstärke. Will man an Stelle von einphasigem Wechselstrom dreiphasigen Wechselstrom transformieren, so kann man hierfür drei Einphasen-Transformatoren benützen, die in Stern- oder in Dreieckschaltung an das Dreiphasennetz angeschlossen werden. Vom Standpunkt der Betriebsführung aus zeigt dieses System erhebliche Vorteile, jedoch der Materialaufwand und der Platzbedarf führten zwangsläufig zur Kombination der drei Einphasen-Transformatoren zu einem einzigen Drehstromtransformator. Um die Bauhöhe zu verringern baut man neben der dreischenkligten Normalgestalt Fünfschenkel-Transformatoren. Diese können mit der Eisenbahn und auf der Straße transportiert werden.

Die Nennleistung eines Transformators ist die Scheinleistung.

Diese wird bei den Transformatoren in kVA angegeben. Die Sternschaltung hat den Vorteil, daß sie den Netznullpunkt bildet, der zum Anschluß des Nulleiters im Drehstromverteilungsnetz oder zum Anschluß von Erdschlußspulen gebraucht wird. Eine starke Belastung des Nullpunktes ist bei allen Bautypen möglich. Die Transformatoren, bei denen eine Dreieckswicklung mit einer Sternwicklung kombiniert ist, besitzen volle Nullpunktbelastbarkeit.

Ü b u n g e n :

35. Was versteht man unter einem Transformator?
36. Welchen Zweck erfüllt das Transformatoröl?
37. Auf welchem Grundgesetz beruht die Wirkung des Transformators?
38. Wozu benötigt man Wandler (Strom- bzw. Spannungswandler)?

3.9. Allgemeingültige Bestimmungen, Schutzmaßnahmen, Verhütung von Unfällen

Der Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) wurde im Jahre 1893 in Berlin gegründet. Zu den wichtigsten Aufgaben des Verbandes gehört die Aufstellung von Vorschriften und Normen für das Fachgebiet der Elektrotechnik. Durch Zusammenarbeit mit allen zuständigen Dienststellen hat der Verband erreicht, daß allmählich alle deutschen Länder die ausdrückliche Anerkennung seiner Sicherheitsvorschriften aussprachen. Dadurch wurden die VDE-Vorschriften staatlicherseits allen nachgeordneten Stellen als anerkannte Regeln der Technik auferlegt. Durch Zusammenarbeit aller in Frage kommenden Kreise ist es der deutschen Elektrotechnik gelungen, sich vorbildliche Sicherheitsbestimmungen und Normen auf dem Wege der Selbstverwaltung zu schaffen. Für die Einhaltung dieser Sicherheitsbestimmungen sorgt die Selbstdisziplin aller Elektriker.

Seit 1937 sind diese Vorschriften gesetzlich verankert. Elektrische Energieanlagen und Verbraucher sind ordnungsgemäß nach den anerkannten Regeln der Elektro-

technik einzurichten und zu unterhalten. Die Vorschriften sind in einem Vorschriftenbuch zusammengefaßt. Auf Grund der Verordnung über Register für Gütevorschriften und die Errichtung von Überwachungsstellen für technische Normen vom 10. Februar 1950 sowie der Verordnung über die Einführung staatlicher Standards und Durchführung der Standardisierungsarbeiten in der Deutschen Demokratischen Republik vom 30. September 1954 wurden die Bestimmungen des Vorschriftenwerkes deutscher Elektrotechniker in das Zentralregister für Gütevorschriften beim Amt für Standardisierung der Staatlichen Plankommission der Regierung der Deutschen Demokratischen Republik mit rechtsverbindlicher Wirkung eingetragen. Die Veröffentlichung der rechtsverbindlichen Bestimmungen erfolgte im Ministerialblatt der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 8 vom 10. März 1952, Seite 20, sowie im Zentralblatt der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 4, Nr. 24, Nr. 34 von 1955 sowie Nr. 9 Nr. 18, Nr. 23 und Nr. 37 von 1954. Es handelt sich hierbei um nahezu 200 Vorschriften.

Alle unter Spannung stehenden Teile müssen gegen zufällige Berührung geschützt sein.

Lackierung oder Emaillierung gelten nicht als ausreichender Schutz, sie zählen zur Betriebsisolierung.

Die betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teile müssen außerdem durch Schutzverkleidungen (Umhüllungen) gegen Berühren geschützt sein.

Abdeckungen und Schutzgitter sind widerstandsfähig und zuverlässig zu befestigen. So müssen z. B. Steckvorrichtungen neben der Schutzverkleidung einen **Berührungsschutz** in dem Sinne haben, daß es beim Stecken nicht möglich ist, einen Steckstift zu berühren, der bereits Kontakt mit der Steckhülse bekommen hat (Bild 44).

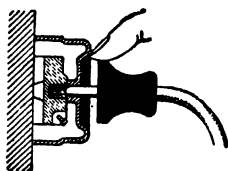


Bild 44 Steckvorrichtung
mit Berrührungsschutz

Es ist notwendig, daß alle leitfähigen Teile einer Anlage, die nicht spannungsführend sind, die aber durch Isolationsfehler (Feuchtigkeit, Leitungsbruch) spannungsführend werden können, gegen zu große Berührungsspannung geschützt sind.

Hierunter versteht man die im Störfalle zwischen den stromführend gewordenen Anlageteilen und der Erde auftretende Spannung, soweit sie von einem Menschen überbrückt werden kann (Bild 45 und Bild 46).

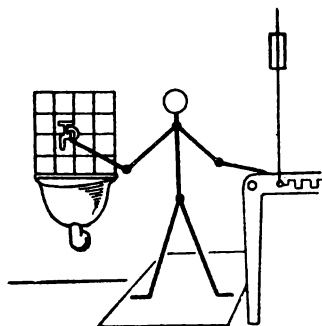


Bild 45 Berührungsspannung zwischen Wasserleitung und Elektroherd

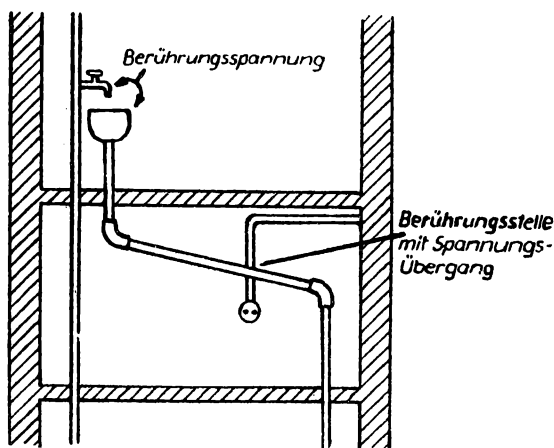


Bild 46 Berührungsspannung zwischen Wasserleitung und Ausguß

Der Schutz durch Isolierung kann dadurch erreicht werden, daß die der Berührung zugänglichen Teile durch isolierende Umkleidung (z. B. isolierende Umpressung von Bedienungsknöpfen am Radio) der direkten Berührung entzogen werden.

Es ist streng untersagt, Arbeiten an spannungsführenden Leitungen vorzunehmen. Sind solche Arbeiten aus betriebstechnischen Gründen nicht zu umgehen (weil z. B. der Betrieb nicht unterbrochen werden darf), so hat sich der Installateur entweder von der Leitung zu isolieren, indem er ausschließlich isolierte Werkzeuge benutzt und sich außerdem auf isolierenden Fußbodenbelag stellt und dadurch einen Stromfluß über seinen Körper zur Erde unmöglich macht. Man nennt

dies **Standortisolierung**. Die Isolierung allein ist jedoch für einen gefahrlosen elektrischen Betrieb nicht ausreichend. Daher hat man Schutzmaßnahmen eingeführt. Unter Schutzmaßnahmen versteht man im Sinne der Vorschrift besondere Maßnahmen. Dazu zählt z. B. die **Kleinspannung**. Kleinspannungen sind Betriebsspannungen bis zu 42 V. Spielzeuge dürfen z. B. nur mit einer Betriebsspannung bis zu 24 V angeschlossen werden. Der Anschluß an Wechselstromnetze ist für Spielzeuge nur gestattet bei Verwendung von Transformatoren oder Umformern mit elektrisch getrennten Wicklungen für eine Betriebsspannung von 24 V (**Bild 47**).

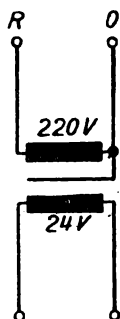


Bild 47 Schutzschaltung durch Kleinspannung

An Gleichstromnetze dürfen Spielzeuge ebenfalls nur bei Verwendung von Umformern mit elektrisch getrennten Wicklungen für eine Betriebsspannung bis 24 V angeschlossen werden. Bohrmaschinen, Kesselreinigungsgeräte dürfen bei Anschluß an das Wechselstromnetz zu Reinigungs-, Instandsetzungs- und sonstigen Anlagen aus elektrisch gut leitenden Werkstoffen nur mit Kleinspannung bis 42 V Verwendung finden. Der Transformator oder Umformer ist zu erden und außerhalb der oben angeführten Anlagen aufzustellen. Für Handleuchten in Kesseln und Faßausleuchten sowie in engen Räumen (Schächten) mit gutleitenden Bauteilen muß bei Wechselstrom die Betriebsspannung durch besondere, außerhalb des Kessels untergebrachte Transformatoren mit getrennten Wicklungen bis auf mindestens 42 V herabgesetzt werden. In besonderen Fällen kommt die sog. Schutztrennung bei Benutzung von 220-V-Geräten in Frage (**Bild 48**).

Merken Sie sich:

Als Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung gelten nicht im Sinne der Vorschrift die Isolierung durch Lacke, Farbstoffumhüllungen (Umspinnung) usw., sondern die **Schutzisolierung**, z. B. Verkleidung als zusätzliche Isolierung zur **Betriebsisolierung**.

Die Standortisolierung ist eine Schutzisolierung, bei welcher der Mensch durch seinen Standort gegen **Erde** isoliert ist.

Die **Kleinspannung** ist eine Schutzmaßnahme.

Die Schutzmaßnahmen sollen Schutz gegen Gefährdung durch zu hohe Berührungsspannung geben. Schutzmaßnahmen sind anzuwenden bei Betriebs-

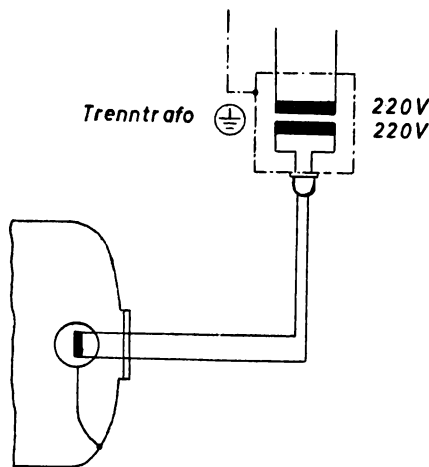


Bild 48 Anwendung der Schutztrennung mittels Trenntransformators

spannung über 250 V durchweg und¹ bei Betriebsspannung von 65 bis 250 V, wenn besondere Gefährdungen vorliegen. Die Schutzmaßnahmen können erreicht werden durch Kleinspannung, Schutzerdung, Nullung, Schutzschaltung, Schutzleitungssystem.

Als **Erdung** gilt eine kurze, gut leitende Verbindung, z. B. eines Motorengehäuses mit der Erde. Eine gute Erdung erreicht man durch Anschluß an das Wasserleitungsnetz oder durch besondere Erder, die in Grundwasser eingebettet werden. Entsteht in einer elektrischen Handbohrmaschine ein Körperschluß, d. h. hat ein Leiter (eine Phase) metallische Berührung mit dem Motorgehäuse erlangt, so bildet sich ein zusätzlicher Stromkreis gegebenenfalls über Ihren Körper zur Erde. Über den menschlichen Körper kommt somit ein Fehlerstrom zustande, dessen Stärke durch die Höhe der Leiterspannung und durch die Summe aller Widerstände des Fehlerstromkreises bestimmt wird. Durch ein mehr oder weniger starkes Kribbeln besonders an den Fingerspitzen (Berührungsstellen) macht sich der Fluß des Fehlerstromes bemerkbar. Stehen Sie zufällig mit der schadhafte Bohrmaschine auf einem feuchten Fußbodenbelag, so können Sie bei Berührung der Bohrmaschine einen kräftigen elektrischen Schlag bekommen. Aus diesem Grund sind die elektrischen Geräte besonders in den Betrieben und auf Baustellen zu erden.

Die Erdung hat aber nur Sinn, wenn zwischen Motorgehäuse und Erde keine beträchtliche Spannung, die für den Menschen gefährlich werden kann, bestehen bleibt. Es ist deshalb gefordert worden, daß bei Erdleitungen ein sehr geringer Widerstand in bezug auf die Erdleitung bis zur eigentlichen Erde vorhanden sein muß. Ein Abwandern von Elektronen stört die Neutralität der Erde unmerklich, deshalb gibt man der Erde auch das Bezugspotential Null.

In modernen Verteilernetzen wird, wie Sie bereits wissen, ein Nulleiter mitgeführt. Sie kennen alle die sogenannte Schuko-Steckdose, desgleichen die Schuko-Stecker, ferner die Gerätesteckvorrichtungen mit Schutzkontakt. Das sind Einrichtungen, die zur Durchführung der Schutzmaßnahme „Nullung“ beitragen. Das Bild 49 zeigt Ihnen eine Gerätesteckvorrichtung mit Schutzkontakt.

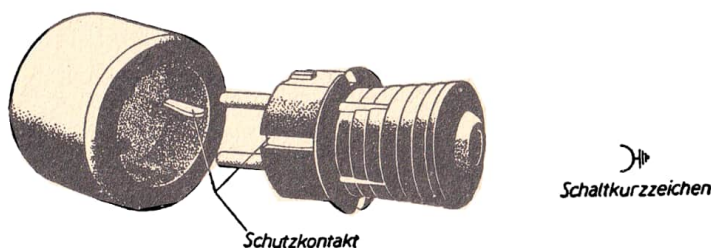


Bild 49 Schukostecker mit Schukosteckdose

Bei genullten Netzen ist es nicht erforderlich, eine besondere Erdleitung an den Schutzkontakt der Steckdose heranzuführen. Die fabrikmäßig in jeder Schuko-Steckdose angebrachte Anschlußstelle wird dann direkt mit dem Nulleiter verbunden. Vom Schuko-Stecker bis zum Gerät ist ein dreiadriges Gummikabel erforderlich. Das gilt für genullte und auch geerdete Anlagen. Die dritte Ader im Kabel (rote Leitung) wird an das Gehäuse und den Schutzkontakt des

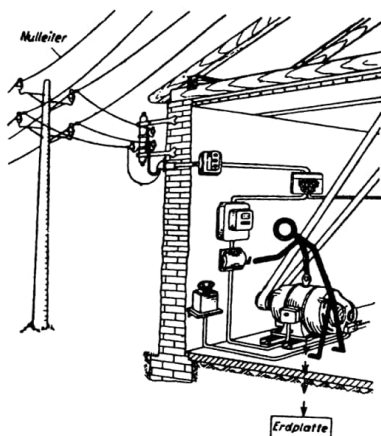


Bild 50 Schutz der Anlage gegen Berührungsspannung durch Erdung

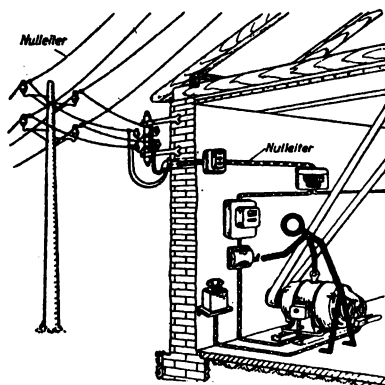


Bild 51 Schutz der Anlage gegen Berührungsspannung durch Nullung
(meist werden Maschinen noch zusätzlich geerdet)

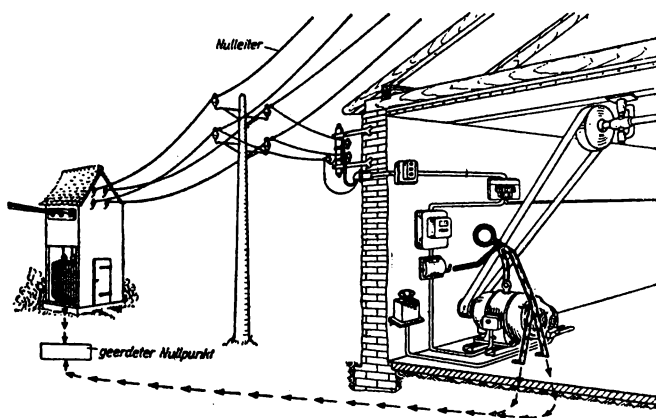


Bild 52 Stromdurchgang durch den menschlichen Körper bei Berührung
spannungsführender Teile in einer mit keinerlei Schutz gegen Berührungsspannung versehenen Anlage

Steckers angeschlossen. Beachten Sie, daß auch nicht durch Verwendung von Kupplungs-Steckvorrichtungen und ähnlichen Verbindungen bei beweglichen Leitungen die durchgehende Schutzleitung unterbrochen ist. In Räumen, wo gut

isolierende Fußböden vorhanden sind (z. B. in Wohnungen), werden Schutzmaßnahmen nicht unbedingt gefordert.

Die Bilder 50, 51, 52 zeigen Ihnen in bildlicher Form die Anwendung der Erdung und Nullung bei elektrischen Anlagen.

Blitzschutz

Die Spannung eines Blitzes beträgt etwa 10^8 V, wobei im Mittel Stromstärken bis $2 \cdot 10^4$ A für eine Zeitdauer von 10^{-6} s auftreten. Wenn Sie diese Werte in die Arbeitsgleichung einsetzen, ergeben sich:

$$W = 10^8 \text{ V} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \frac{10^{-6} \text{ s}}{3600} \approx 56 \text{ kWh}$$

Dies ist eine **Energiemenge**, die in bezug auf Erzeugung durch ein Elektrizitätswerk kaum in Erscheinung tritt. Um diese Energie durch Verfeuerung von Braunkohle zu gewinnen, würden etwa 100 kg Kohle benötigt, wenn ein Wirkungsgrad von 20 % vorliegt (eine Dampflokomotive erreicht nur einen Wirkungsgrad zwischen 7 und 9 %).

Die **Leistung** des Blitzes dagegen übertrifft die unserer größten Kraftwerke, weil die an sich nicht sehr große Arbeit auf kurze Zeit zusammengedrängt ist. Wir können die Blitzenergie nicht nutzbar machen, weil wir keine geeigneten Speicher haben.

Die Leistung des Blitzes errechnet sich in unserem Fall nach der Leistungsformel

$$P = 10^8 \text{ V} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ A} = 2 \cdot 10^{12} \text{ kW}$$

Die Blitze als solche sind sichtbare elektrische Funken von größter Stärke. Es handelt sich bei Blitzen um Entladungsvorgänge (Elektrostatik) zwischen Wolken oder zwischen Wolken und Erde. Der Blitz bewirkt Erschütterung der Luftmassen (Donner) und sucht sich, wenn er zur Erde schlägt, den kürzesten Weg durch meist erhöhte Gegenstände (Bäume, Häuser) zur Erde. Damit ist häufig eine akute Brandgefahr oder Zerstörung verbunden. Besonders blitzgefährdet sind solche Stellen der Erde, wo Wasseradern in nicht allzu großer Tiefe unter dem Erdreich ihren Weg gesucht haben. Sie können in der Natur beobachten, daß an blitzgefährdeten Stellen sogar die Hochspannungsfreileitungen und sonstige Leitungen verkabelt werden. Da die Elektrizität ihren Weg durch gutleitende Metalle ohne weitere Funkenbildung zurücklegt, schützt man Bauten durch Blitzableiter, Hörnerableiter hingegen haben den Zweck, bei auftretenden Überspannungen (Blitzauswirkungen) dem auftretenden Lichtbogen die Brennstelle vorzuschreiben und die Ableitung zur Erde einzuleiten. Sie verhindern damit die Zerstörung der Isolatoren bei Freileitungen. Über die Ausführung von Blitzschutzanlagen können Sie im Tabellenbuch für die Elektrotechnik, Ausgabe C, von W. Friedrich, nachlesen.

Eine besondere Schutzmaßnahme zwischen oberirdischen Fernmeldeleitungen und darüber angeordneten Hochspannungsleitungen (Kreuzungen) ist das Schutznetz (Fangnetz). Es handelt sich hierbei um ausgespannte geerdete blanke Drähte, die herabfallende Hochspannungsleitungen abfangen sollen (Bahnkreuzungen). Neuerdings verkabelt man die Fernmeldeleitungen bei Kreuzungen.

Durch Schutzschalter wird eine defekte Hochspannungsleitung von der Spannungsquelle selbsttätig abgeschaltet. Auf weitere Schutzschaltungen (elektronische Lichtschranken bei Arbeitsmaschinen) soll nicht eingegangen werden. **Merken Sie sich:**

Unter **Erdung** versteht man die leitende Verbindung zwischen den zu erdenden leitenden Teilen und dem Erdreich (**Bild 53**). Im Gegensatz dazu unterscheidet man die Betriebserdung, z. B. die Erdung des Sternpunktes im Leitungsnetz. Die Betriebserde kann im Betriebszustand spannungsführend sein und ist daher isoliert zu verlegen.

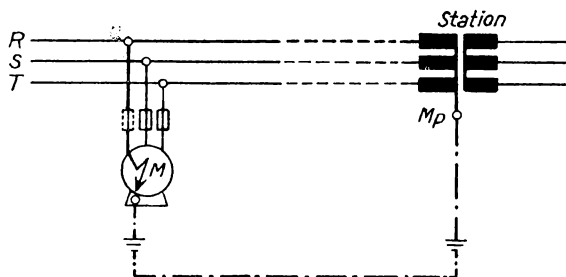


Bild 53 Schutzerdung in elektrischen Anlagen bei geerdetem Netz

Die Nullung ist die leitende Verbindung zwischen den nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teilen elektrischer Betriebsmittel und dem Nullleiter (**Bild 54**). Die Leitung darf nicht abgesichert werden (**Bild 55**).

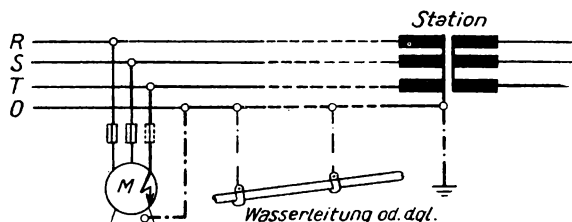


Bild 54 Genulltes Netz

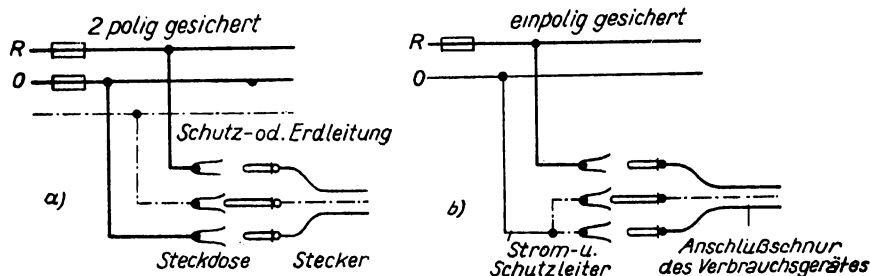


Bild 55 So werden Schukoanschlußschnuren eines Verbrauchsgerätes angeschlossen

a) an ein Netz, welches die Nullungsbedingungen nicht erfüllt

b) an ein genulltes Netz

Leider ist es häufig der Fall, daß in den Betrieben und bei Wohnhäusern diese Anlagen zwar vorhanden sind, jedoch nicht unterhalten werden. Aufgabe ist es für Sie, die Betriebsleitung auf solche Mißstände hinzuweisen und mit Nachdruck für die Instandsetzung dieser Anlagen zu sorgen. Sie schützen damit nicht nur unser volkseigenes Gut, sondern auch Ihr eigenes Leben.

Feuerlöscher

Es würde im Rahmen dieser Lehrbriefe zu weit führen, auf die Unzahl von Feuerlöschern einzugehen, die im Gebrauch sind. Sie beruhen alle auf dem Prinzip, einem Feuer den zum Brennen notwendigen Sauerstoff zu entziehen und meistens noch die brennende Fläche abzukühlen. Die Anwendung der Feuerlöscher muß von Zeit zu Zeit geübt werden. Von den Lieferfirmen wird angegeben, daß man mit bestimmten Feuerlöschgeräten elektrische Lichtbögen anspritzen kann. Es empfiehlt sich allerdings, zum Schutze der eigenen Person niemals Lichtbögen anzuspritzen, da die jeweiligen Umstände meist nicht klar erkannt werden können. Ihre Hauptaufgabe besteht zunächst darin, den brennenden Anlagenteil restlos spannungslos zu machen, um andere Anlagenteile nicht mitzugefährden und das Feuer ungehindert bekämpfen zu können. Es ist mit Ihrer Pflicht, sich Kenntnis vom Ort der Sicherungen und Trennschalter im Betrieb zu verschaffen, da nicht immer der zuständige Elektriker rechtzeitig herbeigerufen werden kann.

Merken Sie sich, daß die Aufhängestellen für Feuerlöscher so zu wählen sind, wo, örtlich gesehen, die geringste Feuersgefahr besteht.

Für die Bekämpfung von Bränden in elektrischen Anlagen sind nur ganz bestimmte Löschmittel zu benutzen. Keinesfalls darf Wasser zur Brandbekämpfung

verwendet werden, da es stromleitend ist. Für diese Zwecke stehen vier verschiedene Handfeuerlöscher zur Verfügung.

Der Kohlendensäureschneelöcher (CO_2) hat eine Spritzweite von 1 m und eine Spritzdauer von 25 s.

Der sich bildende Kohlendensäureschnee nimmt Temperaturen bis etwa minus 79°C an, weshalb Körperberührung zu vermeiden ist. Dieser Löcher eignet sich für empfindliche elektrische Teile (Telefonzentralen).

Der Kohlendensäuretrockenlöcher hat eine Spritzweite von etwa 5 bis 8 m bei einer Spritzdauer von 12 bis 15 s je nach Füllmenge. Das Löschpulver führt zur Krustenbildung an elektrischen Geräten, hingegen der Schneelöcher keinerlei Rückstände hinterläßt.

Besonders intensive Löschwirkung entwickelt der Tetralöcher. Das Löschmittel trägt die Firmenbezeichnung Emixol. Dieser Löcher soll vorwiegend im Freien

DIN TETRA 2 Beuert T 2 L/S

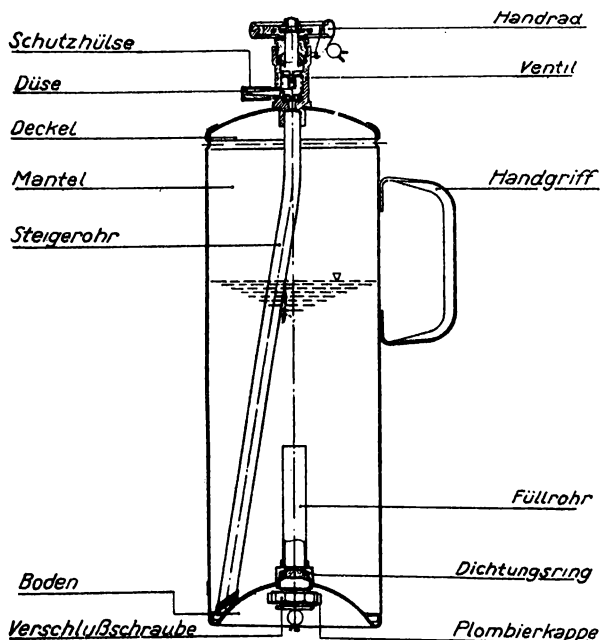


Bild 56 Tetralöcher T2 L S mit Preßluftpolster

angewendet werden. Er entwickelt eine Spritzhöhe in Schräglage bis zu 6 m. Die Emixol-Löscher sind jederzeit abstellbar und können daher mehrmals eingesetzt werden. Der Betriebsdruck des Preßluftpolsters beträgt etwa 6 atü. Kraftfahrzeuge werde vorzugsweise mit diesem Löscher ausgerüstet.

Der Bromidlöscher (Emixin) hat ähnliche Eigenschaften, jedoch ist die Löschwirkung des Emixins doppelt so groß. Das Bild 56 zeigt Ihnen einen Tetralöscher. Abschließend sollen Sie noch auf das Merkblatt für die Erste Hilfe bei Unfällen durch elektrischen Strom verwiesen werden.

4. Erste Hilfe bei Unfällen durch den elektrischen Strom

Auch der anscheinend Leblose infolge Unfalles durch elektrischen Strom bedarf schneller Hilfe, grundsätzlich darf nie sein Tod angenommen werden. Bei der Hilfeleistung keine überstürzten Handlungen ausführen, weil Selbstgefährdung durch den Strom besteht.

Die Erste Hilfe bei Unfällen durch elektrischen Strom soll möglichst nicht von einem Helfer allein, sondern zu zweit oder mit mehreren Personen geleistet werden.

Wenn möglich, ist auch ein Elektriker hinzuzuziehen.

Die Benachrichtigungen haben sofort entsprechend den Aufzeichnungen der „Ersten-Hilfe-Tafeln“ (Arbeitsschutzanordnung 20 § 2) zu erfolgen. Insbesondere sind also auch

- a) der Betriebsarzt oder nächstwohnende Arzt,
- b) eine Rettungsmannschaft mit Sauerstoffgerät (DRK, Feuerwehr, Grubenwehr) sofort zu benachrichtigen.

Die unverzügliche Versorgung des Verunglückten am Unfallort darf jedoch nicht aufgeschoben oder unterbrochen werden!

4.1. Sachgemäße Befreiung des Verunglückten aus dem Stromkreis

4.1.1. Ist ein Unfall in einer elektrischen Anlage — Umspannstation oder Freileitung — eingetreten, die durch einen Blitzpfeil, sonstige Warnschilder oder hinsichtlich ihrer Größe auffällige Porzellanisolatoren als eine Hochspannungsanlage erkenntlich ist, darf die Bergung des Verunglückten nur durch Personen erfolgen, die mit den Gefahren einer solchen Anlage vertraut sind. Der Laie soll schnellstens den zuständigen Verantwortlichen der Energieversorgung benachrichtigen. Angaben über deren Fernsprechnummer usw. befinden sich in jeder Umspannstation außerhalb des Gefahrenbereiches an der Innenseite der Tür oder in Tüرنähe auf entsprechenden Aushängen bzw. sind vermerkt in den dort hängenden Stationskarten oder Stationsbüchern.

4.1.2. Bei Unfällen im Niederspannungsnetz: Haushalt, Landwirtschaft, öffentliche Beleuchtung, Werkstatt usw. ist vor Bergung des Verunglückten sofort der Stromkreis zu unterbrechen durch:

- a) Lichtschalter oder Maschinenschalter abschalten,
- b) Stecker aus Steckkontakt herausziehen,
- c) nächstliegende Sicherungen herausdrehen,
- d) Hauptschalter ausschalten,
- e) Hauptsicherungen herausdrehen.

Jede dieser Handlungen wird den Verunglückten unmittelbar vom Stromkreis trennen. Es soll jeweils die zur schnellsten Unterbrechung des Stromkreises führende Maßnahme gewählt werden, die zudem für den Helfenden die geringste Gefährdung bietet.

Wenn der Stromkreis nicht oder nicht sofort zu unterbrechen ist, sind zur Befreiung des Verunglückten von der Leitung folgende Maßnahmen zu ergreifen:

Der Helfer stelle sich selbst isoliert (auf Glasscherben, trockenes Holz, Kleidungsstücke) und umwickle Hände mit Tüchern und Kleidungsstücken (besser Gummi- oder Lederhandschuhe).

Unter den Verunglückten ist isolierendes Material (Holzbrett, Glasscherben, Gummi, Linoleum, in völlig trockenem Zustand) zu schieben, damit die Unterbrechung des Stromkreises durch den Verunglückten erfolgt.

Hilfspersonen zum Auffangen des Verletzten aufstellen, wenn Absturz droht!

4.2. Maßnahmen gegen die allgemeine Lebensgefährdung nach einem Unfall durch elektrischen Strom

Solche Maßnahmen sind entsprechend § 5 der ASAO 20 vorzubereiten, wobei vor allem diesbezügliche regelmäßige Übungen durchgeführt sein müssen.

4.2.1. Der Verunglückte ist bei Bewußtsein:

Besondere Maßnahmen sind nicht erforderlich. Der Verunglückte ist mindestens während der ersten 30 Minuten nicht zu verlassen, auch nicht um Unterstützung herbeizuholen, denn während dieser Zeit können noch Störungen der Herz- und Atemtätigkeit eintreten. Für bequeme Flachlagerung, möglichst am offenen Fenster, gut zugedeckt, ist zu sorgen; der Puls und die Atmung sind zu beobachten.

4.2.2. Der Verunglückte ist bewußtlos:

Er **atmet normal** oder noch einigermaßen regelmäßig. keine besonderen Maßnahmen, auch keine künstliche Beatmung. Auf Atemerleichterung durch Entfernen beengender Kleidungsstücke achten.

Hört die Atmung auf, sofort mit künstlicher Beatmung beginnen.

4.2.3. Der Verunglückte atmet nicht:

Sofort künstliche Beatmung am Unfallort durchführen. Grundsatz: Atemwege frei halten, Zahnersatz entfernen, laufend rhythmisch beatmen. **Zunge herausziehen bzw. niederdrücken, damit Luftröhre frei wird.**

Folgende Beatmungsmethoden werden empfohlen:

4.2.3.1. Die Brustmethode in Bauchlage:

Der zu Rettende ist bäuchlings, mit nach vorn geneigtem Gesicht, auf seinen im spitzen Winkel zum Kopf gelegten Armen zu lagern. Der kopf-

wärts hinter dem Verunglückten kniende Helfer drückt bei vorgebeugtem Oberkörper und gestreckten Armen, mit auf den Rücken des Bewußtlosen aufgelegten Händen, dessen Brustkorb gegen die feste Bodenunterlage.

Der Helfer richtet sich auf, erfaßt die Oberarme des Verunglückten dicht neben dem Ellenbogen und hebt sie leicht an, so daß sich dessen Brustkorb durch Anheben ausdehnt. Dieser Vorgang wiederholt sich 16mal in der Minute.

4.2.3.2. Zweiarmsverfahren:

Den zu Rettenden flach auf den Rücken legen, Rolle aus Kleidungsstücken unter die Schulterblätter schieben, um den Kopf tief zu lagern. Kopf zur Seite drehen und **Zunge hervorziehen**. Der Helfer kniet hinter dem Kopf des Verunglückten, das Gesicht diesem zugewandt, faßt dessen Arme in Mitte der Unterarme und drückt mit diesen über den Rippenbögen den Brustkorb zusammen.

Der Helfer richtet sich auf und führt die Arme des Verunglückten etwa halbkreisförmig dicht am Boden entlang zum Kopf. Dieser Vorgang (Ein- und Ausatmung) wiederholt sich 16mal in der Minute.

4.2.3.3. Die Beatmung mit der „Wippe“ als Beatmungsgerät, die auch industriell hergestellt wird:

Bis die Wippe bereitgestellt ist, ist nach den bereits angegebenen **m a n u - e l l e n** Methoden zu beatmen.

Die Umlagerung auf eine „Wippe“ muß sehr schnell durch geübte Gesundheitshelfer erfolgen.

Den zu Rettenden rücklings auf ein genügend langes (etwa 2 m) und breites Brett (z. B. Türflügel) legen und ihn in Höhe der Oberschenkel festbinden. Kopf auf eine Seite legen.

Das Brett ist in der Mitte so hoch zu unterstützen, wie ein Drittel seiner Länge ausmacht (z. B. 70 cm bei einem 2 m langen Brett). Diese Wippe ist so zu bewegen, daß ca. 10mal in der Minute der Kopfteil zur Erde **gesenkt** wird und so weit gehoben wird, daß der Fußteil die Erde berührt. Mit Senkung des Kopfes ist zu beginnen. Zeigen sich danach noch eingeatmete Massen in Mund und Nase, sind diese schnell zu entfernen.

4.2.4. Dauer der künstlichen Beatmung:

Die Wiederbelebung beim Unfall durch elektrische Durchströmung ist grundsätzlich bis 4 Stunden durchzuführen.

Setzt die Atmung des Verunglückten wieder ein und ist regelmäßig, ist die künstliche Beatmung sofort einzustellen, verschlechtert sich die Atmung wieder, ist unmittelbar erneut künstlich zu beatmen.

Offenbar erfolglose Wiederbelebungsversuche dürfen nur auf Anordnung des Arztes eingestellt werden. Erfolglos bleibt die Wiederbelebung, wenn

sichere Zeichen des Todes (Totenstarre, Ausbildung der Totenflecke an den abhängenden Körperteilen, Weichwerden des Augapfels) eintreten.

4.2.5. Maßnahmen gegen Kreislaufversagen:

4.2.5.1. Puls oder Herzschlag des Verunglückten sind — wenn vielleicht auch nur schwach — noch zu fühlen:

Keine besonderen Maßnahmen einleiten.

4.2.5.2. Puls oder Herzschlag sind nicht mehr feststellbar: Ein bis zwei (nicht mehr!) kräftige (aber nicht gewaltsame!) Faustschläge mit untergelegter Hand auf die Herzgegend der vorderen Brustwand, um die Herztätigkeit anzuregen. Auch bei Herzstillstand weiter künstlich beatmen! Sonstige auf die Herztätigkeit und den Kreislauf gerichtete Maßnahmen von seiten des Laien sind zu unterlassen. Sie sind allein von der Entscheidung des Arztes abhängig.

4.3. Maßnahmen bei Verletzungen

4.3.1. Unmittelbare Stromschäden (Verbrennungen, Verkohlungen, Gewebeertrümmerungen) beim Unfall durch elektrischen Strom:

4.3.1.1. Verletzten bequem und flach lagern. Wunden nur sauber, wenn möglich keimfrei bedecken, sonst nicht berühren. Keine örtliche Behandlung! Verletzten sorgfältig vor Kälte schützen (evtl. Wärmeflaschen), jedenfalls zusätzlich Decken und Kleidungsstücke. Auch Hitzeeinwirkungen vermeiden. Größte Ruhe in der Umgebung. Neugierige fernhalten. Unterhaltung mit dem Verletzten auf das Nötigste beschränken; Erörterung des Unfallherganges ist unzulässig.

4.3.1.2. Alkali-Behandlung nur bei Verunglückten mit erhaltenem oder mit wieder eingetretenem Bewußtsein, bei denen schwere oder ausgedehnte Verbrennungen vorliegen. Es werden möglichst bald 2 gestrichene Eßlöffel doppelkohlensaures Natron (wie es im Haushalt vielfach benutzt wird und in jeder Drogerie käuflich ist) in einem Liter Wasser gelöst und tassenweise im Abstand von 10 Minuten gegeben. Der Helfer sollte das Getränk vorher kosten. Der Verletzte muß soweit bei Bewußtsein sein, daß er selbst trinken kann. Auch während des Transportes zum Krankenhaus diese Alkali-Therapie nicht unterbrechen. Nicht mehr als 1 Liter insgesamt geben.

4.3.2. Mittelbare Verletzungen beim Unfall durch elektrischen Strom:

4.3.2.1. Im Zusammenhang mit Unfällen durch Elektrizität kann es zu Knochenbrüchen und Verrenkungen kommen. Diese können schwerwiegender sein, als die unmittelbare Schädigung durch den elektrischen Strom.

4.3.2.2. Erste Hilfe nach den Grundsätzen, die für Verletzungen gelten.

4.4. Transport

- 4.4.1.** Jeder durch elektrischen Strom Verletzte, sofern er transportfähig ist, wird in das nächstliegende Krankenhaus als Schwerstverletzter überführt. Transportfähigkeit besteht nur, wenn die Atmung selbsttätig und regelmäßig ist. Der Transport soll in einem geeigneten Fahrzeug, am besten Krankenwagen, erfolgen, in dem notfalls während der Fahrt künstlich beatmet werden kann.

Das Krankenhaus ist möglichst im voraus zu verständigen. In schweren Fällen soll dem Arzt eine Beschreibung der äußeren Verletzungen und des bisherigen Verlaufs gegeben werden. Der Transport ist schonend durchzuführen (z. B. Trage im Krankenwagen in die Federungen einhängen). Bei Knochenbrüchen ist Schienung unbedingt notwendig.

4.5. Stromeinwirkungen

Auch bei scheinbar unerheblichen Stromeinwirkungen wird empfohlen, den Betroffenen zu einem Arzt zu bringen.

Dieses Merkblatt soll in den nach ASAO 20, § 2 durchzuführenden Belehrungen erläutert werden, die Beatmungsmethoden sind gemäß ASAO 20, § 5 regelmäßig zu üben.

ANTWORTEN und LÖSUNGEN

1. Beim Wechselstrom ändert sich die Stärke und Richtung des Stromes periodisch mit der Zeit im Gegensatz zum Gleichstrom. Dies wird durch periodische Veränderungen der Spannung verursacht.
2. Man unterscheidet den Scheitelwert, den sich ständig ändernden Augenblickswert und den Effektivwert.
3. $U_{\max} = 380 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 536 \text{ V}$
4. $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} = 314 \text{ s}^{-1}$
 $\omega t = 314 \text{ s}^{-1} \cdot 0,003 \text{ s} = 0,942$ (Winkel im Bogenmaß), Umrechnen in Gradmaß
 $\alpha = 0,942 \cdot 57,30 = 54^\circ$. Zu diesem Winkel gehört $u = 30 \text{ V}$
 $u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$
 $30 \text{ V} = U_{\max} \cdot \sin 54^\circ = U_{\max} \cdot 0,809$
 $U_{\max} = 37,1 \text{ V}$
5. Wechselstrom, zu dessen Verteilung eine Doppelleitung genügt (meist Phase gegen Nulleiter).
6. Maschine, bei der das Polrad innerhalb des Ständers läuft. Hierbei ist die Schwungmasse verhältnismäßig gering. Diese Bauart ist die gebräuchlichste, weil die hochgespannten Wechselströme bequem der ruhenden Wicklung entnommen werden können.
7. Es sind nur die gleichzeitig wirkenden Momentanwerte zu addieren.
8. Nach dem Vektor- oder Zeigerpolygon. Die letzte Seite des Polygons ist die gesuchte Spannung.
9. $X_C = 398 \Omega$ $J = 0,553 \text{ A}$
10. $X_L = 62,8 \Omega$ $J = 1,99 \text{ A}$
11. Als Blindwiderstand bezeichnet man im wesentlichen den kapazitiven und den induktiven Widerstand.
12. Strom- bzw. Stromanteil, der zusammen mit der zu ihnen gehörenden Spannung zur mittleren Leistung nicht beiträgt!
13. $R = 600 \Omega$, $R_L = 942 \Omega$, $R_C = 796 \Omega$, $R_s = 620 \Omega$
 Wählen Sie den Maßstab so, daß 1 Millimeter 10Ω entspricht. Die Grundlinie bildet $R = 6 \text{ cm}$. Sie errichten die Senkrechte und tragen $R_L = 9,42 \text{ cm}$ ab. Von der Spitze der Senkrechten ziehen Sie $R_C = 7,96 \text{ cm}$ ab und schließen das Dreieck durch die Hypotenuse $R_s = 6,2 \text{ cm}$.
14. Auch ein Blindstrom erzeugt in der Leitung, in der er fließt, Wärme, da der Widerstand einer Leitung nicht Null ist.
15. Induktive Blindleistung wird durch Magnetfelder und kapazitive durch elektrische Felder hervorgerufen. Wirken beide Blindleistungen in einem Stromkreis, dann sind sie voneinander zu subtrahieren.

16. Er ist ein Quotient $\cos \varphi = P_w : P_s$, das Verhältnis der Wirk- zur Scheinleistung.
17. Weil er die zusätzlichen Belastungen der Leitungen (des Netzes) und der Transformatoren und Generatoren bei Phasenverschiebung charakterisiert. Der Leitungsquerschnitt und die Größe der Generatoren ist von der Scheinleistung abhängig.
18. Durch Phasenschieber-Kondensatoren, wenn der Strom der Spannung **nach**eilt, was meistens der Fall ist. Durch Synchronmaschinen und durch richtige Bemessung der Wechselstrommotoren. Leerlaufende Motoren sind **abzu**schalten, da sie nur bei Vollast ihren maximalen Leistungsfaktor erreichen.
19. $J = 7,66 \text{ A}$
20. Wicklungsgrade multiplizieren
 $\eta_{\text{ges}} = 0,63$
21. Eine Zusammensetzung mehrerer Einphasensysteme.
22. Beim Zweiphasensystem 90° , beim Dreiphasensystem 120° .
23. Beim verketteten Dreiphasensystem sind die einzelnen Stränge entweder in Stern oder in Dreieck miteinander verbunden.
24. 21.A
25. Sternschaltung: $J_L = J$ und $U_L = \sqrt{3} \cdot U$
Dreieckschaltung: $J_L = \sqrt{3} \cdot J$ und $U_L = U$
26. Null
27. Bei gleicher Belastung ist die Gesamtleistung gleich der dreifachen Strangleistung, bei ungleicher Belastung müssen die Strangleistungen einzeln addiert werden.
28. a) $J_L = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot t \cdot 860} \quad J_L = 0,061 \text{ kA}$
(Joulsches Gesetz nach J aufgelöst!)
- b) Sternschaltung: $R = \frac{U_L : \sqrt{3}}{J_L} = \frac{220 \text{ V}}{61 \text{ A} \cdot \sqrt{3}} = 2,09 \, \Omega$
($J_L = J$)
- Dreieckschaltung: $R = \frac{U_L}{J_L : \sqrt{3}} = \frac{220 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{61 \text{ A}} = 6,24 \, \Omega$
($U_L = U$)
29. Drei um 120° gegeneinander versetzte Wicklungsstränge werden von dem Dreiphasenstrom durchflossen. Da die Strangströme um $\frac{1}{3}$ Periode gegeneinander verschoben sind, erzeugen sie nacheinander drei Magnetfelder, die sich zu dem rotierenden Feld zusammensetzen.

30. Nach der Formel $n = \frac{60 \cdot f}{p}$

- 31. Das Drehfeld induziert in der kurzgeschlossenen Wicklung des Rotors einen Strom, dessen Richtung nach der „Rechten-Hand-Regel“ bestimmt wird. Da sich aber die Stromleiter in dem rotierenden Drehfeld befinden, wirkt auf diese eine Kraft, deren Richtung nach der „Linken-Hand-Regel“ bestimmt wird. Diese Kraft erzeugt ein Drehmoment in der Drehrichtung des Feldes.**
- 32. Der Schlupf ist das Zurückbleiben des Rotors gegen das Drehfeld. Er ist um so größer, je größer die Belastung des Motors ist.**
- 33. Ein Synchronmotor hat als Rotor ein Magnetrad, dessen Pole durch Gleichstrom erregt werden. Die Drehzahl des Polrades ist bei jeder Belastung gleich der Drehzahl des Drehfeldes. Vor dem Einschalten der Statorwicklung muß das Polrad erst durch eine fremde Kraft auf die synchrone Drehzahl gebracht werden.
Ein Asynchronmotor dagegen läuft von selbst an, seine Drehzahl ist um den Schlupf kleiner als die des Drehfeldes.**
- 34. Weil ihr Anlassen umständlich ist und sie eine starre, von der Belastung unabhängige Drehzahl haben.**
- 35. Ein Transformator formt eine gegebene Wechselspannung in eine andere gleicher Frequenz um.**
- 36. Transformatorenöl besitzt die sechsfache Durchschlagsfestigkeit gegenüber Luft und erhält den Isolationszustand der eingetauchten Wicklungen. Das Öl dient zugleich als Kühlmittel, da es außerdem eine größere Wärmeleitfähigkeit aufweist.**
- 37. Die Wirkung des Transformators beruht auf der elektromagnetischen Induktion, die Faraday im Jahre 1831 entdeckte.**
- 38. Der Stromwandler bezweckt die Herabsetzung des Meßstroms auf einen niedrigen genormten Wert und die galvanische Trennung der Meßgeräte von der Hochspannung.**

FORMELSAMMLUNG

$$u = U_{\max} \cdot \sin \alpha \qquad f = \frac{1}{T} \qquad 1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{s}$$

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$$

$$u = U_{\max} \cdot \sin (\omega t \pm \varphi) \qquad \omega = 2 \pi \cdot f \qquad f = \frac{n \cdot p}{60}$$

$$i = J_{\max} \cdot \sin (\omega t \pm \varphi) \qquad J_{\max} = J \cdot \sqrt{2} \qquad U_{\max} = U \cdot \sqrt{2}$$

$$E/V = B/\frac{Vs}{cm^2} \cdot v/\frac{cm}{s} \cdot l/cm \qquad e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$X_L = \omega \cdot L \qquad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$R_s = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} \qquad R_s = Z \text{ (Scheinwiderstand)}$$

$$U = J \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \qquad f_o = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Wechselstrom	Drehstrom
$P = U \cdot J \cdot \cos \varphi$	$U_L = \sqrt{3} \cdot U \text{ (Stern)}$
$P_s = U \cdot J$	$J_L = \sqrt{3} \cdot J \text{ (Dreieck)}$
$P_b = U \cdot J \cdot \sin \varphi$	$P_w = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \cos \varphi$
$U_w = U \cdot \cos \varphi$	$P_b = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L \cdot \sin \varphi$
$U_b = U \cdot \sin \varphi$	$P_s = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot J_L$
$J_w = J \cdot \cos \varphi$	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$
$J_b = J \cdot \sin \varphi$	

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

SCHARF

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHELEKTRO- TECHNIKER

6

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAVS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-06/63



1963

ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 6

Gleichstrommaschinen

von

Ing. Erich Scharf

2. Auflage

Herausgeber:
Zentralstelle für Fachschulausbildung
Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,-

Ag 616/ 80 /63

Best.-Nr. 5030-06/63

1 Gleichstrommaschinen

1.1 Allgemeines über Gleichstrommaschinen

1.11 Wirkungsweise	3
1.12 Der Aufbau der Gleichstrommaschine	4
1.13 Die Ankerrückwirkung	8
1.14 Die Wendepole	9

1.2 Gleichstromgeneratoren

1.21 Die Erregung der Gleichstrommaschinen	11
1.22 Die Größe der erzeugten Urspannung	12
1.23 Der fremderregte Generator	13
1.24 Der Nebenschlußgenerator	15

1.3 Gleichstrommotoren

1.31 Das Drehmoment	18
1.32 Die Gegenspannung	19
1.33 Das Anlassen der Gleichstrommotoren	20
1.34 Der Reihenschlußmotor	23
1.35 Der Nebenschlußmotor	25
1.36 Der Doppelschlußmotor	27

1.4 Die Drehzahländerung der Motoren

1.41 Drehzahländerung mit Regelanlasser	31
1.42 Drehzahländerung durch Feldänderung	31
1.43 Die Leonardschaltung	33
1.44 Die Umkehr der Drehrichtung bei Gleichstrommotoren	36

1.5 Bauformen, Schutzarten und Kühlung elektrischer Maschinen

1.51 Bauformen elektrischer Maschinen	38
1.52 Schutzarten bei elektrischen Maschinen	40
1.53 Kühlung elektrischer Maschinen	43

Antworten und Lösungen	46
------------------------	----

1 Gleichstrommaschinen

1.1 Allgemeines über Gleichstrommaschinen

1.11 Wirkungsweise

Wie Ihnen bekannt ist, wird in einem Leiter bei Veränderung des ihn umgebenden Kraftfeldes eine Urspannung induziert. Erhält der Leiter die Form einer Windung und wird diese in einem Magnetfeld drehbar angeordnet, dann kann die induzierte Urspannung über den mit den Leiterenden verbundenen Schleifringen aus Bronze, auf denen Bürsten aus Kohle gleiten, abgenommen werden. Bild 1 zeigt die Anordnung.

Wie Sie mittels der Rechten-Hand-Regel feststellen können und es Ihnen auch das Galvanometer zeigt, wird bei dieser Anordnung an den Bürsten ein Wechselstrom abgenommen. Um Gleichstrom im äußeren Stromkreis zu erhalten, muß noch eine Vorrichtung - der Stromwender oder Kommutator, der fälschlich als Kollektor bezeichnet wird - angebracht werden.

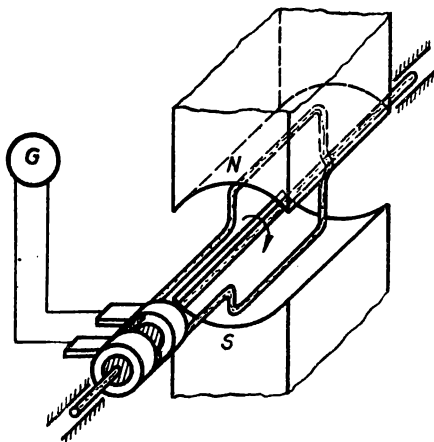


Bild 1: Prinzip der Wechselstromerzeugung

Führt man umgekehrt der Leiterschleife einen Gleichstrom so zu, daß die Stromrichtung in den Leiterhälften unter den Polen immer dieselbe ist, dann wird infolge der Kraftwirkung, die ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld erfährt, die Leiterschleife in Um-

drehungen versetzt. Die gleiche Stromrichtung in den Leiterhälften führt ebenfalls der Stromwender herbei.

Sie erkennen: Einer mit einem Stromwender versehenen Leiterschleife im Magnetfeld kann, wenn sie angetrieben wird, eine Gleichspannung entnommen werden, oder wenn man sie an eine Gleichspannung legt, wird sie in Umdrehungen versetzt. Sie wirkt also einmal als Generator, zum anderen als Motor.

1.12 Der Aufbau der Gleichstrommaschine

Bei den Gleichstrommaschinen wird das Magnetfeld durch Elektromagnete erzeugt. Die Elektromagnete sind in einem Gehäuse, das dem magnetischen Fluß wenig Widerstand bietet, angebracht. Das Gehäuse, Magnetgestell oder Joch ist in den meisten Fällen kreisförmig (Bild 2). Diese Jochform ermöglicht es, mehrere Polaritäten parallel unterzubringen und entspricht am besten den Festigkeitsanforderungen. Nur in Fällen, in denen der Einbauraum begrenzt ist, wird das Joch in rechteckiger Form ausgebildet. Das ist z.B. der Fall bei Bahn- und Kranmotoren. Bei den elektrischen Maschinen bezeichnet man grundsätzlich den Teil, in dem die Spannung induziert wird, als

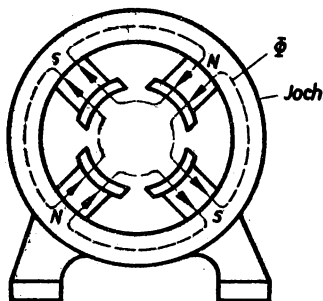


Bild 2: Magnetgestell einer vierpoligen Gleichstrommaschine

Anker (Bild 3 D). Bei den Gleichstrommaschinen besteht der Anker aus der Ankerwelle, dem Ankerkörper und dem Stromwender. Die in den Lagerschildern (Bild 3 A und C) angebrachten Lager nehmen die Ankerwelle auf. Nur bei sehr großen Maschinen werden besondere auf dem Fundament aufgeschraubte Stehlager verwendet (Bild 4).

Der Ankerkörper, der aus gegeneinander isolierten Blechen von 0,35 - 0,5 mm Dicke zusammengesetzt ist, ist auf die Ankerwelle aufgepreßt. Sein Umfang ist mit Nuten versehen. Sie dienen

zur Aufnahme der Wicklung. Der Widerstand der Ankerwicklung ist sehr klein, um den Spannungsabfall in der Maschine ebenfalls klein zu halten.

- A Lagerschild, antriebsseitig
- B Magnetgestell
- C Lagerschild, stromwenderseitig
- D Anker mit Lüfter und Stromwender
- E Bürstenbrücke
- 1 Gleitlager
- 2 Hauptpol m. Wicklung
- 3 Wendepol m. Wicklung
- 4 Klemmbrett
- 5 Tragöse
- 6 Klemmbrettschutzkappe
- 7 Ankerkörper
- 8 Bandage z. Schutz gegen die Auswirkung der Fliehkräfte
- 9 Stromwender
- 10 Innenlüfter
- 11 Nutenkeil f. Riemen-scheibe
- 12 Bürstenbolzen
- 13 Bürstenhalter mit Bürsten

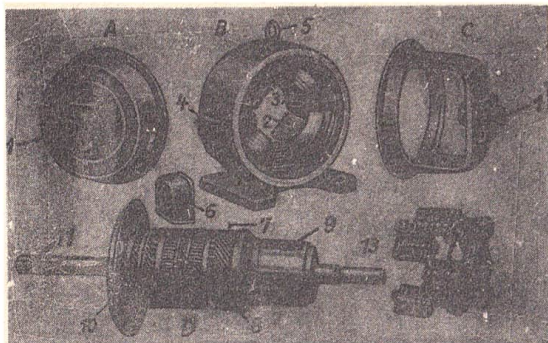


Bild 3: Aufbau einer Gleichstrommaschine mit Schildlager

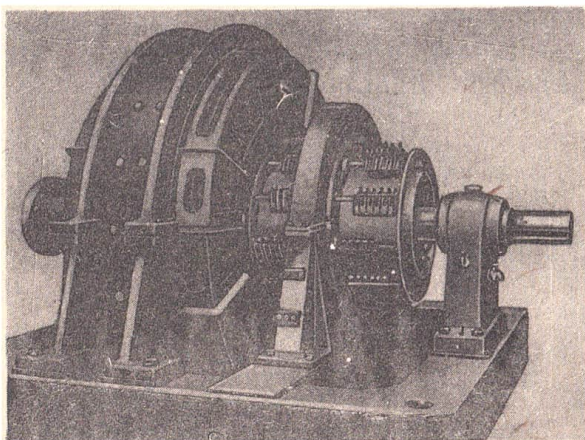


Bild 4: Zehnpolige Gleichstrommaschine mit Stehlagern für 1800 kW

Würde der Ankerkörper aus massivem Eisen hergestellt, so entstünden in ihm durch Induktion sehr hohe Wirbelströme, die wiederum eine sehr starke Erwärmung des Ankers zur Folge hätten. Durch die Blechung können nur kleine Wirbelströme auftreten, die durch Verwendung legierter Bleche noch weiter herabgesetzt werden. Um die Streuung der Kraftlinien möglichst klein zu halten, muß der Ankerkörper aus Eisen bestehen; außerdem muß der Luftzwischenraum zwischen Pol und Ankerkörper so klein wie möglich gehalten werden. Zur Kühlung ist der Ankerkörper mit Lüftungsschlitzen versehen und besitzt außerdem häufig auch an den Stirnseiten angebrachte Lüfter (Bild 3).

Ebenso wie der Ankerkörper ist der Stromwender, dessen Aufbau Sie aus Bild 5 sehen, auf die Ankerwelle gepreßt. Aus Bild 6 erkennen Sie seine Wirkungsweise. Die Drahtenden der Leiterschleife des Bildes 1 sind zu zwei voneinander isolierten Ringsegmenten aus Kupfer, die mit der Drehachse fest verbunden sind

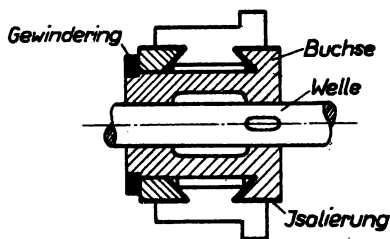


Bild 5: Stromwender

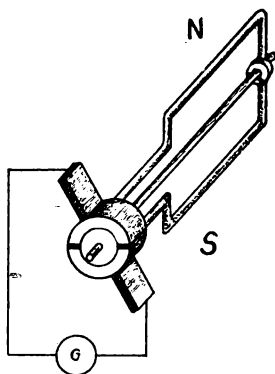


Bild 6: Prinzip des Kommutators

und auf denen zwei Bürsten schleifen, geführt. Die beiden Ringsegmente werden durch die Bürsten kurzgeschlossen. Dieser Kurzschluß ist ohne Bedeutung, wenn die Bürsten in der neutralen Zone, d.h. in der Lage zwischen N- und S-Pol, stehen, wobei in der Leiterschleife keine Spannung induziert wird. Im äußeren Stromkreis fließt dann ein Gleichstrom, der allerdings zwischen Null und einem Höchstwert schwankt

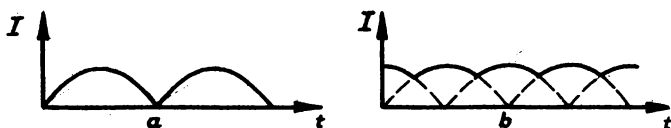


Bild 7: Pulsierender Gleichstrom

a) von einer

b) von zwei Spulen

(Bild 7 a). Die Schwankungen der Spannung bzw. des Stromes werden durch eine große Anzahl von Spulen ausgeglichen (Bild 7 b). Die kleinen Spannungsschwankungen sind dann kaum noch wahrnehmbar; die Spannung ist praktisch eine normale Gleichspannung. Zu jeder Spule gehören 2 Ringsegmente oder Lamellen auf dem Stromwender. Stehen die Bürsten bei der Stromwendung nicht genau in der neutralen Zone, dann treten in den kurzgeschlossenen Spulen Selbstinduktionsspannungen auf, die einen Unterbrechungslichtbogen zur Folge haben. Je größer der Belastungs- oder Ankerstrom ist, desto stärker ist der Lichtbogen. Diese Funkenbildung, die als "Feuern" bezeichnet wird, führt zur Zerstörung des Stromwenders. Durch Verstellung der Bürsten kann man das Feuern unterbinden.

Die Bürsten, die durch Federn leicht auf den Stromwender gedrückt werden, sind in den Bürstenhaltern befestigt, die auf Bürstenbolzen sitzen und in der Bürstenbrücke ihren Halt finden (Bild 3). Die Bürstenbrücke ist auf dem stromwenderseitigen Lagerschild verdrehbar befestigt. Ihre richtige Stellung, in der sie durch eine Schraube festgehalten wird, ist häufig durch einen roten Strich markiert.

Bei großen Maschinen ist der Stromwender zweiteilig ausgeführt und das Magnetgestell und die Lagerung der Bürstenbrücke sind geteilt (Bild 4).

1.13 Die Ankerrückwirkung

So lange im Anker einer Gleichstrommaschine kein Strom fließt, ist das Magnetfeld gleichmäßig über die Pole verteilt. Die Kraftlinien durchsetzen den Anker in senkrechter Richtung. Durch die magnetische Induktion entsteht im Anker bei S' ein Südpol, bei N' ein Nordpol (Bild 8).

Beim Generator fließt, wenn der Stromkreis geschlossen ist, entsprechend der gezeichneten Drehrichtung ein Strom in den Ankerdrähten, der ein Ankerfeld erzeugt, das seinen Nordpol bei n und seinen Südpol bei s hat.

Dieses Anker- oder Querfeld steht senkrecht zum Hauptfeld. Das Hauptfeld mit dem Fluß Φ_M und das Querfeld mit dem Fluß Φ_A setzen sich zu einem resultierenden Feld mit dem Fluß Φ_r zusammen. Die

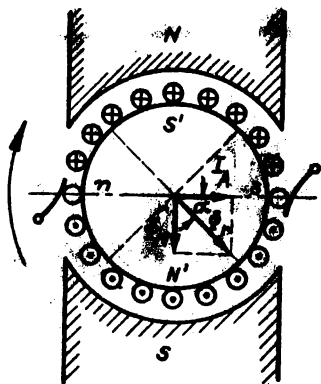


Bild 8: Ankerrückwirkung

Kraftlinien verlaufen daher nicht mehr senkrecht, sondern schräg durch den Anker: das Hauptfeld ist nicht mehr gleichmäßig über die Pole verteilt. Durch den Einfluß des Ankerfeldes wird das Hauptfeld nach einer Polkante hin abgedrängt. So entsteht an der Polkante eine Verstärkung des Feldes, wo Pol- und Ankerfeld gleichgerichtet sind; eine Schwächung an der Stelle, wo die Felder eine entgegengesetzte Richtung haben. Beim Generator tritt also Verstärkung an der ablaufenden, Schwächung an der anlaufenden Polkante auf. Beim Motor ist es umgekehrt. Das Auftreten eines Ankerfeldes bei Belastung der Maschine nennt man Ankerrückwirkung.

Sie erkennen: Bei stromlosem Anker fällt die elektrisch neutrale Zone mit der geometrisch neutralen Zone zusammen. Bei Belastung verschiebt sich aber infolge der Ankerrückwirkung die elektrisch neutrale Zone um den Winkel α . Weil die Bürsten in der neutralen Zone stehen müssen, sind sie ebenfalls

um den Winkel α zu verschieben; d.h. beim Generator müssen sie im Sinne der Drehung, beim Motor im Gegendrehsinn verschoben werden.

1.14 Die Wendepole

Zur Verhinderung des "Feuerns" müßten bei Maschinen mit stark schwankender Belastung die Bürsten dauernd verschoben werden. Die Bürstenverschiebung müßte hinfällig sein, wenn das Quersfeld nicht vorhanden wäre. Das kann man offenbar erreichen, wenn ein gleich großes, entgegengesetzt gerichtetes Quersfeld geschaffen wird. Hierzu dienen die Hilfs- oder Wendepole, die zwischen den Hauptpolen angeordnet sind (Bild 3). Weil die Größe des Ankerfeldes vom Ankerstrom abhängt und das Gegenquersfeld gleich groß sein soll, so müssen die Wicklungen der Wendepole vom Ankerstrom durchflossen werden, wobei jedoch auf die richtige Polung zu achten ist. So muß beim Generator in Drehrichtung auf einen N-Hauptpol ein S-Wendepol, beim Motor auf jeden Hauptpol ein gleichpoliger Wendepol folgen.

Die Anschlüsse der Magnetwicklungen und der Bürsten sind am Gehäuse auf dem Klemmbrett angebracht (Bild 3). Zur einheitlichen Bezeichnung der einzelnen Klemmen dienen große Buchstaben. So werden in jedem Falle die Ankeranschlüsse (Bürstenanschlüsse) mit A - B bezeichnet, die Anschlüsse der Wendepolwicklung mit G - H. Häufig ist die Klemme G der Wendepolwicklung im Inneren der Maschine mit der Ankerwicklung (Klemme B) verbunden, so daß an das Klemmbrett nur ein Anschluß herausgeführt ist (H).

Zusammenfassung

Die Hauptbestandteile einer Gleichstrommaschine sind:

1. das Magnetgestell
2. der Anker
3. die Bürsten mit den Bürstenhaltern
und der Bürstenbrücke.

Das Magnetgestell enthält die Haupt- und Wendepole. Der Anker besteht aus der Ankerwelle, dem Ankerkörper und dem Stromwender oder Kommutator.

Der Ankerkörper ist aus Blechen zusammengesetzt; dadurch wird die Wirbelstrombildung gemindert.

Durch den Stromwender wird erreicht, daß der Generator eine Gleichspannung liefert, obwohl in den Ankerspulen eine Wechselspannung induziert wird.

Die Spannung wird durch die Kohlebürsten, die auf dem Stromwender gleiten, abgenommen bzw. zugeführt. Die Bürsten sind in Bürstenhaltern angebracht, die auf Bürstenbolzen sitzen. Diese wiederum sind in der drehbaren Bürstenbrücke befestigt.

Im stromdurchflossenen Anker einer Gleichstrommaschine tritt ein Anker- oder Quersfeld auf.

Das Auftreten eines Ankerfeldes wird als Ankerrückwirkung bezeichnet. Die Ankerrückwirkung ist von der Belastung der Maschine abhängig und erfordert eine Verschiebung der Bürsten, um funkenfreien Lauf zu erzielen.

Bei Maschinen mit Wendepolen braucht bei schwankender Belastung keine Bürstenverschiebung zu erfolgen, weil durch die Wendepole das Quersfeld aufgehoben wird.

Ü b u n g e n

1. Aus welchen Teilen besteht das Magnetgestell einer Gleichstrommaschine?
2. Warum muß der Anker einer Gleichstrommaschine aus einzelnen Blechen zusammengesetzt sein?
3. Bei einem Gleichstrommotor tritt nach längerem Betrieb, obwohl die Kohlebürsten nicht abgenutzt sind und auch der Stromwender nicht verschmutzt ist, starkes Bürstenfeuer auf. Was kann die Ursache sein und was unternehmen Sie, um das Feuern zu beseitigen?

4. Welche Aufgaben haben die Wendepole?

5. Warum muß die Wendepolwicklung vom vollen Ankerstrom durchflossen werden?

1.2 Gleichstromgeneratoren

1.21 Die Erregung der Gleichstrommaschinen

Zur Erregung des Magnetismus wird Gleichstrom benötigt, der durch die Spulen der Magnete - die Feldmagnete - geschickt wird. Dieser Strom wird als Erregerstrom, die Wicklung als Erregerwicklung bezeichnet. Nach Art der Erregerstromquelle teilt man die Gleichstrommaschinen ein (Tafel 1).

Art der Maschine	Erregerstromquelle
Maschine mit Fremderregung	Akkumulatorenbatterie oder andere Gleichstromquelle
Maschine mit Eigenerregung	Ein Gleichstromgenerator, der mit dem Generator mittelbar oder unmittelbar gekuppelt ist und der nur zur Erregerstromlieferung dient.
Maschine mit Selbsterregung	Der Generator selbst

Tafel 1: Einteilung der Gleichstrommaschinen nach Art der Erregung.

Bei den Maschinen mit Selbsterregung nutzt man den Restmagnetismus - die Remanenz - der Pole aus. Bei Drehung des Ankers wird durch das schwache Feld eine Spannung induziert, die einen Strom so durch die Erregerwicklung treibt, daß das remanente Feld verstärkt wird. Dadurch wächst die Induktionsspannung und der Erregerstrom und damit wiederum das Feld und so fort, bis eine gewisse Sättigungsgrenze erreicht ist (Dyna-

elektrisches Prinzip von Werner von Siemens).

Je nach der Schaltung der Erregerwicklung unterscheidet man:

- Hauptstrommaschinen:** Der gesamte Strom fließt durch die Feldwicklung. Klemmenbezeichnungen: (Bild 9) A - B - E - F.
- Nebenschlußmaschinen:** Die Feldwicklung liegt im Nebenschluß, sie wird nur von einem Teil des Ankerstromes durchflossen. Klemmenbezeichnungen: (Bild 10) A - B - C - D.
- Doppelschlußmaschinen:** Sie enthält Haupt- und Nebenschlußwicklungen. Klemmenbezeichnungen: (Bild 11) A - B - E - F - C - D.

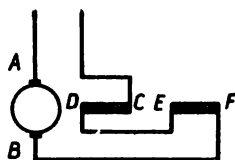
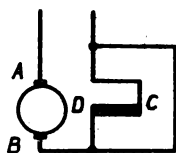
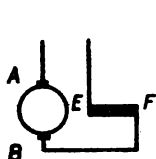


Bild 9: Hauptstrommaschine

Bild 10: Nebenschlußmaschine

Bild 11: Doppelschlußmaschine

1.22 Die Größe der erzeugten Urspannung

Sie wissen, daß die Höhe der in einem Leiter induzierten Spannung von der Änderungsgeschwindigkeit des umfaßten Kraftflusses abhängt, in unserem Falle also von Φ und n . Faßt man die an einer vorhandenen Maschine konstanten Größen, wozu z.B. auch die Anzahl der Ankerleiter gehört, zu einer Konstanten c zusammen, so ergibt sich

$$E = c \cdot \Phi \cdot n$$

(1)

Diese Gleichung sagt aus:

Die Urspannung einer Maschine steigt bei konstantem

Fluß proportional der Drehzahl n und bei konstanter Drehzahl n proportional dem Fluß Φ bis zur magnetischen Sättigung.

Daß die Klemmenspannung U_K einer Spannungsquelle um den inneren Spannungsabfall kleiner als die Ursprungung E ist, wissen Sie sicherlich noch. Ist I_A der Ankerstrom und R_A der Ankerwiderstand einschließlich des Bürstenübergangswiderstandes, dann gilt

$$U_K = E - I_A \cdot R_A$$

(2)

1.23 Der fremderregte Generator

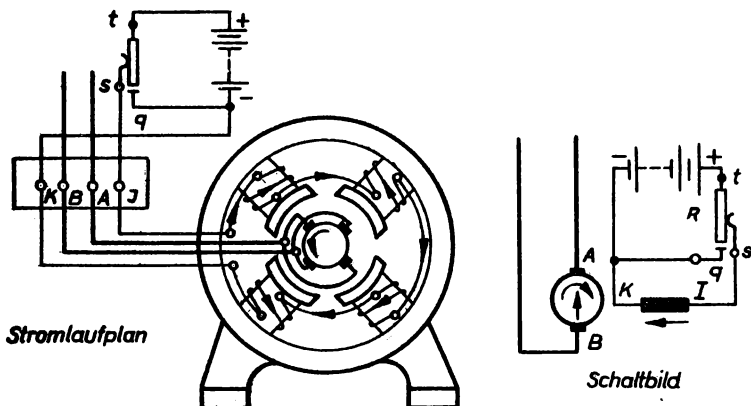


Bild 12: Gleichstromgenerator mit Fremderregung

Bild 12 zeigt den Stromlaufplan und das Schaltbild eines Generators mit Fremderregung. Beachten Sie die Klemmenbezeichnungen! Die Erregerwicklung liegt an den Klemmen J - K. Im Erregerstromkreis liegt ein Regulierwiderstand - Spannungs-, Feld-, auch Nebenschlußregler genannt - mit den 3 Klemmen s, t, q. Die Klemme q dient zum Kurzschließen der Erregerwicklung beim Ausschalten des Widerstandes. Das ist notwendig, damit der beim Ausschalten in der Wicklung entstehende Induktionsstrom, ohne Schaden anrichten zu können, abklingen kann.

Bild 13 zeigt Ihnen die Leerlaufkennlinie des fremderregten Generators. Sie wird erhalten, wenn man die induzierte Urspannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei konstanter Drehzahl aufträgt. Sie hat Ähnlichkeit mit dem Verlauf der Magnetisierungskurve. Überlegen Sie, weshalb das so sein muß! Infolge des Restmagnetismus beginnt die Leerlaufkennlinie etwas oberhalb des Nullpunktes.

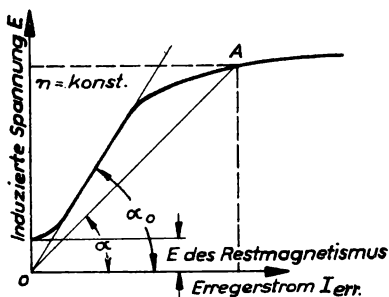


Bild 13: Leerlaufkennlinie

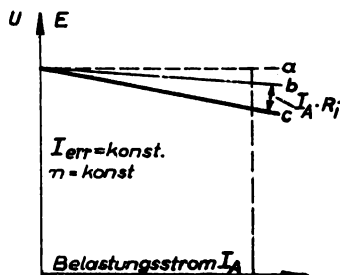


Bild 14: Belastungskennlinie des fremderregten Generators

Wird der Generator bei konstanter Erregerstromstärke und konstanter Drehzahl mit einem Verbraucher verbunden, also belastet, dann erhält man seine Belastungskennlinie, wenn die Spannung in Abhängigkeit vom Belastungsstrom aufgetragen wird (Bild 14). Bei unbelasteter Maschine fließt im Anker kein Strom; es ist $U = E$. Infolge der Belastung fließt durch den Anker ein Strom. Dieser ruft die Ankerrückwirkung hervor, die mit einer Schwächung des Feldes verbunden ist. Das bedeutet, daß bei Maschinen ohne Wendepole mit größer werdender Belastungsstromstärke die Urspannung nicht nur um den Spannungsabfall $I_A \cdot R_A$ absinkt, sondern auch um einen gewissen Betrag, der durch die Ankerrückwirkung hervorgerufen wird. Überlegen Sie, wie groß die Klemmenspannung bei Kurzschluß wird!

Je nach Maschinengröße beträgt bei Nennlast der Abfall der Klemmenspannung 5 - 10 %.

Die Generatoren werden unabhängig von der Belastung mit konstanter Drehzahl angetrieben. Die Spannung muß auch bei Be-

lastungsänderung möglichst konstant sein. Das erreicht man durch Änderung des Erregerstromes mittels selbsttätiger Feldregelung durch die sog. Fil- oder Schnellregler.

Bei Generatoren mit Fremderregung kann die Spannung durch Änderung des Erregerstromes leicht von nahezu Null bis zur Nennspannung geändert werden.

1.24 Der Nebenschlußgenerator

Die Leerlaufkennlinie des Nebenschlußgenerators, dessen Schaltbild Ihnen Bild 15 zeigt, entspricht der des fremderregten Gleichstromgenerators. Weshalb muß das so sein?

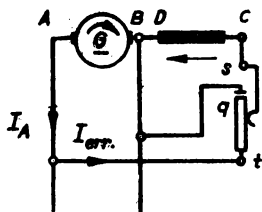


Bild 15: Schaltbild des Nebenschlußgenerators

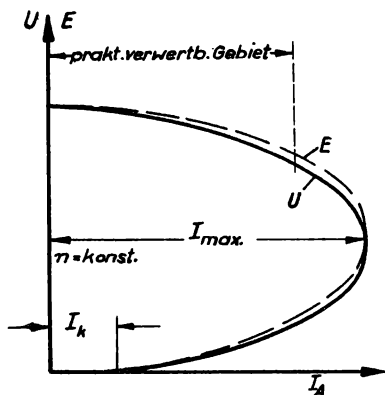


Bild 16: Belastungskennlinie des Nebenschlußgenerators

Die Belastungskennlinie (Bild 16) wird hier ebenfalls wie in 1.23 erhalten. Bei wach-

sender Belastung sinkt die Urspannung durch die Ankerrückwirkung. Eine weitere Verkleinerung der Urspannung ist durch den Ohmschen Spannungsverlust und die zunehmenden Stromwärmeverluste in der Maschine bei stärkerer Belastung bedingt.

An den Klemmen der Maschine liegt die Erregerwicklung. Sinkt die Klemmenspannung, dann wird auch der Erregerstrom kleiner, der magnetische Fluß nimmt ab. Bei einer bestimmten Belastungsstromstärke I_{max} , die bedeutend über der normalen liegt, sinkt die Klemmenspannung so stark, daß die Maschine sich nicht mehr selbst erregt. Infolgedessen sinkt die Spannung auf Null ab.

Normalerweise bleibt der Erregerstrom auch bei veränderlicher Last nahezu gleich, so daß Erregerfeld und erzeugte Spannung fast konstant sind. Spannungsschwankungen, die infolge der oben angeführten Ursachen auftreten, lassen sich leicht mittels des Nebenschlußreglers ausgleichen. Der Nebenschlußgenerator eignet sich daher gut zur Speisung von Beleuchtungsanlagen.

Der Kurzschlußstrom ergibt sich aus

$$I_K = \frac{E_{\text{Remanenz}}}{R_i}$$

wobei R_i den gesamten inneren Widerstand der Maschine bezeichnet. Weil E_{Remanenz} klein ist, ist auch der Kurzschlußstrom klein.

Bei den Generatoren mit Selbsterregung muß auf die Drehrichtung geachtet werden. Als üblicher Drehsinn gilt der Rechtslauf, also Lauf im Uhrzeigersinn, von der Antriebsseite aus gesehen. Überlegen Sie, wie sich eine Drehrichtungsänderung des Ankers ohne Veränderung der Schaltung auswirkt!

Zusammenfassung

Unter Erregung versteht man die Erzeugung des magnetischen Feldes. Man unterscheidet Fremderregung, Eigenerregung und Selbsterregung. Je nach der Schaltung der Erregerwicklung unterscheidet man Reihen-, Neben- und Doppelschlußmaschinen.

Am Klemmbrett der Maschinen sind die Anschlußklemmen der Wicklungen mit großen Buchstaben bezeichnet. A - B: Ankerwicklung, E - F: Hauptstromwicklung, C - D: Nebenschlußwicklung.

Die Urspannung eines Generators steigt bei konstantem Fluß Φ mit der Drehzahl n und bei konstanter Drehzahl n proportional dem Fluß Φ bis zur magnetischen Sättigung. Die Klemmenspannung U_K ist gegenüber der Urspannung E des Generators um den inneren Spannungsabfall des Generators kleiner.

Beim fremderregten Gleichstromgenerator werden die Klemmen der Erregerwicklung mit J - K bezeichnet. Die Spannung des fremderregten Generators kann von nahezu Null bis zur Nennspannung durch Veränderung des Erregerstromes geregelt werden. Bei Kurzschluß des fremderregten Generators fließt ein sehr hoher Ankerstrom.

Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator, der eine nahezu konstante Spannung liefert, verliert bei Kurzschluß seinen Erregerstrom. Der Kurzschlußstrom, der nur durch das remanente Feld entsteht, ist klein.

Bei Änderung der Drehrichtung ohne Änderung der Schaltung wird der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator entregt.

Ü b u n g e n

6. Welche Unterschiede weisen Reihen- und Nebenschlußmaschinen in der Erregung auf?
7. Wie werden Gleichstrommaschinen nach der Erregungsart unterschieden?
8. Welche Klemmenbezeichnungen haben der fremderregte Gleichstromgenerator, die Nebenschluß- und die Reihenschlußmaschine?
9. Woran erkennen Sie am Klemmbrett einer Gleichstrommaschine Wendepole?
10. Weshalb müssen Feldregler mit einem Kurzschlußkontakt versehen sein?
11. Warum gibt ein Gleichstromgenerator trotz offenem Erregerstromkreis Spannung?
12. Wie verhält sich ein fremderregter Gleichstromgenerator bei Kurzschluß der Ankerklemmen A - B ?
13. Wie verhält sich die Klemmenspannung eines Gleichstrom-Nebenschlußgenerators bei wachsender Belastung?

14. Wie verhält sich der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator bei Kurzschluß?

15. Ein Nebenschlußgenerator hat einen Ankerwiderstand von $0,05 \Omega$. Der Widerstand der Erregerwicklung wurde mit 120Ω bestimmt. Der Generator liefert eine Urspannung von 400 V in einen Verbraucherwiderstand von 5Ω .

Zu bestimmen ist:

15.1. der Strom im Anker

15.2. die Klemmenspannung des Generators

15.3. die Stärke des Erregerstromes

15.4. die Stromstärke im Verbraucher.

(Anleitung: Zeichnen Sie das Schaltbild und beachten Sie die Schaltung der Widerstände !)

1.3 Gleichstrommotoren

1.31 Das Drehmoment

Legt man den Anker einer erregten Gleichstrommaschine an eine Spannungsquelle mit der Spannung U , dann fließt durch ihn ein Strom. Infolge der Kraftwirkung, die ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld erfährt, entsteht ein Drehmoment, dessen Größe sich nach der Ihnen aus der Physik bekannten Formel

$$M = 716 \frac{P_{\text{mech}}}{n} = 975 \frac{P_{\text{el}}}{n}$$

berechnen läßt.

Die Kraftwirkung, die auf die stromdurchflossenen Ankerdrähte im Magnetfeld ausgeübt wird, hängt unter anderem von der Größe des Flusses und der Stromstärke in den Leitern ab. Faßt man alle an einem vorhandenen Motor konstanten Größen zu einer Konstanten c zusammen, dann erhält man für das Drehmoment

$M = c \cdot \Phi \cdot I_A$

 (3)

Diese Gleichung sagt aus:

Das Drehmoment eines Motors steigt bei konstantem Fluß Φ mit dem Ankerstrom I_A und bei konstantem Ankerstrom I_A proportional mit dem Fluß Φ bis zum magnetischen Sättigungspunkt.

1.32 Die Gegenspannung

Dreht sich der Anker, so tritt in den Ankerspulen eine Veränderung des umfaßten Kraftflusses ein. Es wird also im Anker eine Urspannung induziert, die - wie Sie mit den Ihnen bekannten Richtungsregeln feststellen können - der angelegten Spannung U_K entgegengerichtet ist. Infolge dieser Gegenspannung E_G liegt am Anker somit die Spannung $U_K - E_G$. Damit wird der Ankerstrom (bei Vernachlässigung des Bürstenspannungsverlustes)

$$I_A = \frac{U_K - E_G}{R_1}$$

(4)

wenn unter R_1 der Innenwiderstand des Motors, der sich aus dem Widerstand der Erregerwicklung und dem Ankerwiderstand zusammensetzt, verstanden wird.

Aus Gleichung (4) folgt:

$$U_K = E_G + I_A \cdot R_1$$

Das bedeutet:

Die Klemmenspannung U_K eines Motors ist um den inneren Spannungsabfall $I_A \cdot R_1$ des Motors größer als die Gegenspannung des Motors.

Die vom Motor erzeugte Gegenspannung ist von außerordentlicher Bedeutung. Für die Ermittlung der Größe dieser Spannung kann ohne weiteres die Gleichung (1)

$$E = c \cdot \Phi \cdot n$$

verwendet werden. Läuft z.B. der Motor leer, so wird infolge der entsprechenden Drehzahl n eine Gegenspannung induziert,

die nahezu gleich der Klemmenspannung ist. Bei Belastung überwiegt zunächst das Gegenmoment der Arbeitsmaschine und der Motor fällt mit der Drehzahl ab. Dies bedingt jedoch nach Gleichung (1), daß die Gegenspannung sinkt, so daß die Differenz $U_K - E$ größer wird. Dies wiederum bedingt, daß durch den Anker ein größerer Strom fließt. Bei konstantem Fluß steigt aber das Drehmoment mit dem Ankerstrom, so daß der Motor die Last überwinden kann. Steigt also die Belastung des Motors, dann steigt augenblicklich die Stromstärke auf einen Wert, der der neuen Belastung entspricht. Sie erkennen, daß die Gegenspannung der selbsttätige Regler ist, der die Stromstärke je nach der Belastung regelt.

1.33 Das Anlassen der Gleichstrommotoren

Sie wissen, daß der Ankerwiderstand der Gleichstrommaschinen klein ist. Im Augenblick des Einschaltens ist die Gegenspannung nicht vorhanden, denn der Anker steht ja noch still. Die Stromstärke würde also unzulässig hoch sein, die Wicklung des Motors schädigen und andere ans Netz angeschlossene Verbraucher wegen des großen Spannungsabfalles stören. Um das zu vermeiden, muß dem Anker ein Regelwiderstand, der Anlaßwiderstand oder Anlasser, vorgeschaltet werden. Nach den VDE-Vorschriften, die beim Anschluß elektrischer Maschinen beachtet werden müssen, darf normalerweise bei Gleichstrommotoren mit Anlasser der Anlaßspitzenstrom das 1,7-fache des Nennstromes nicht übersteigen. Ein Anlaßspitzenstrom von 12 A ist in jedem Falle zugelassen. Kleine Motoren unter 0,5 kW können daher bei 220 V, weil sie einen verhältnismäßig hohen Ankerwiderstand haben, direkt an die Netzspannung gelegt werden.

Mit zunehmender Drehzahl erfolgt das allmähliche Abschalten des Widerstandes. Wird das Ausschalten des Widerstandes zu schnell vorgenommen, dann hat der Anker nicht genügend Zeit, seine Drehzahl entsprechend zu steigern und die notwendige Gegenspannung zu erzeugen. Die Ankerstromstärke würde dann unzulässig hoch ansteigen.

Die Größe des Anlaßwiderstandes können Sie mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes bestimmen. Danach ist

$$R = \frac{U_K}{I_{Anl}}$$

wenn $R = R_A + R_W$, worin R_A der Ankerwiderstand, R_W der Widerstand des Anlagers und I_{Anl} die Anlaufstromstärke ist. Es ergibt sich also:

$$R_A + R_W = \frac{U_K}{I_{Anl}}$$

oder

$$R_W = \frac{U_K}{I_{Anl}} - R_A$$

Lehrbeispiel 1

Ein Gleichstrom-Nebenschlußmotor für 220 V hat eine Leistung von 3 kW. Sein Wirkungsgrad beträgt 80%. Berechnen Sie

- 1.1. die Stromstärke, die der Motor aufnimmt,
- 1.2. den Erregerstrom, wenn in der Erregerwicklung 5% der zugeführten Leistung benötigt werden,
- 1.3. den Widerstand der Erregerwicklung,
- 1.4. die Stromstärke im Anker,
- 1.5. den Widerstand des Ankers, wenn in ihm ebenfalls ein Leistungsverlust von 5% auftritt,
- 1.6. die Gegenspannung des Ankers,
- 1.7. die Größe des Anlaßwiderstandes, wenn die Anlaufstromstärke das 1,5-fache der normalen Stromstärke nicht überschreiten soll.

Lösung:

$$1.1. \quad \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}; \quad P_{ab} = \bar{P}_{zu} \cdot \eta = U \cdot I \cdot \eta$$

$$I = \frac{P_{ab}}{U \cdot \eta} = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V} \cdot 0,8} = \underline{\underline{17,05 \text{ A}}}$$

$$1.2. P_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta} = \frac{3000 \text{ W}}{0,8} = 3750 \text{ W}$$

Für die Erregerwicklung benötigte Leistung

$$P_{err} = \frac{3750 \text{ W} \cdot 5\%}{100\%} = 187,5 \text{ W}$$

$$I_{err} = \frac{P_{err}}{U} = \frac{187,5 \text{ W}}{220 \text{ V}} = \underline{\underline{0,852 \text{ A}}}$$

$$1.3. R_{err} = \frac{U}{I_{err}} = \frac{220 \text{ V}}{0,852 \text{ A}} = \underline{\underline{258 \Omega}}$$

$$1.4. I_A = I - I_{err} = 17,05 \text{ A} - 0,852 \text{ A} = \underline{\underline{16,198 \text{ A}}}$$

$$1.5. P_A = I_A^2 \cdot R_A \quad R_A = \frac{P_A}{I_A^2} = \frac{187,5 \text{ W}}{16,198^2 \text{ A}^2} = \underline{\underline{0,715 \Omega}}$$

$$1.6. E_G = U_K - I_A \cdot R_A = 220 \text{ V} - 16,198 \text{ A} \cdot 0,715 \Omega = \underline{\underline{208,42 \text{ V}}}$$

$$1.7. R_W = \frac{U_K}{I_{Anl}} - R_A = \frac{220 \text{ V}}{16,198 \text{ A} \cdot 1,5} - 0,715 \Omega = \underline{\underline{8,34 \Omega}}$$

Weil der Anlaßwiderstand so berechnet ist, daß die Widerstandsdrähte den hohen Anlaufstrom nur kurze Zeit aushalten, darf die Anlaßkurbel nicht längere Zeit oder gar dauernd auf einem Widerstandskontakt stehen bleiben. Ein Durchbrennen des noch eingeschalteten Widerstandsteiles wäre die Folge.

Während das Anlassen langsam geschehen muß, erfolgt das Stillsetzen durch Öffnen des Schalters und Ausrücken des Anlassers. Vor dem erneuten Einschalten überzeuge man sich stets, daß der Anlasser in seiner Ausgangsstellung steht.

1.34 Der Reihenschlußmotor

Wie der Name schon sagt, sind Feld und Anker in Reihe geschaltet. Die Feldwicklung wird folglich vom Ankerstrom durchflossen. Der Feldfluß ist demnach eine Funktion des Ankerstromes:

$$\Phi = f(I_A).$$

Beachten Sie diesen Hinweis besonders, um das Betriebsverhalten des Motors richtig zu verstehen!

Bild 17 zeigt das Schaltbild des Reihenschluß- oder Hauptstrommotors. Achten Sie auf die Klemmenbezeichnungen! Der Anlasser des Reihenschlußmotors ist mit den Klemmen R und L versehen. Die Klemme R ist mit der Klemme A am Motorenklemmbrett verbunden, die Klemme L mit der Netzleitung P; Klemme F mit der Netzleitung N, die Klemmen E und B stehen durch eine Brücke miteinander in Verbindung.

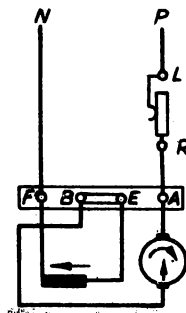


Bild 17: Schaltbild des Reihenschlußmotors

Entsprechend Gleichung (1) gilt für die im Anker induzierte Gegenspannung

$$E_G = c \cdot \Phi \cdot n$$

voraus folgt

$$n = \frac{E_G}{c \cdot \Phi} = \frac{U_K - I_A \cdot R_1}{c \cdot \Phi}$$

Der Spannungsabfall in der Maschine ist verhältnismäßig klein, er kann daher vernachlässigt werden. Setzt man daher $E_G = U_K$, dann wird

$$n \approx \frac{U_K}{c \cdot \Phi}$$

Sie erkennen hieraus, daß bei konstanter Klemmenspannung U_K die Drehzahl vom Fluß Φ abhängt.

Ist der Reihenschlußmotor unbelastet, dann fließt durch Anker und Magnetwicklung ein kleiner Strom, d.h. das Feld ist schwach. Der Anker nimmt eine hohe Drehzahl an und erzeugt eine entsprechende Gegenspannung. Das hat zur Folge, daß der Strom in

der Erregerwicklung noch kleiner wird. Damit steigt die Drehzahl immer mehr und mehr an. Sie wird so hoch, daß der Anker "durchgeht", d.h. er fliegt auseinander. Hieraus folgt:

Der Reihenschlußmotor darf niemals unbelastet laufen. Die Arbeitsmaschine muß mit ihm direkt gekuppelt sein oder über Zahnräder angetrieben werden.

Je höher die Belastung des Reihenschlußmotors ist, desto größer ist der Strom, der durch die Erregerwicklung fließt, und somit auch das Feld. Das bedeutet, daß die Drehzahl mit der Belastung sinkt, also:

Die Drehzahl des Reihenschlußmotors ist nicht konstant.

Aus Bild 18 erkennen Sie das Drehzahlverhalten des Motors.

In 1.31 haben Sie die Gleichung

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_A$$

kennengelernt. Läuft der Motor belastet an, dann fließt durch ihn ein starker Strom, der wiederum ein entsprechend starkes Feld erzeugt. Das Drehmoment ist somit beim Anlauf schon groß, d.h.

der Reihenschlußmotor hat beim Anlauf eine hohe Anzugskraft..

In Bild 18 stellt der Linienzug M das Belastungsmoment des Reihenschlußmotors dar.

Infolge seiner Eigenschaften wird der Reihenschlußmotor dort verwendet, wo große Lasten langsam, kleine Lasten schnell zu bewegen sind und wo eine große Anzugskraft notwendig ist. Das ist z.B. der Fall bei Bahnen und Kranen. Für den Antrieb von Werkzeugmaschinen eignet er sich wegen des lastabhängigen Drehzahlverhaltens nicht.

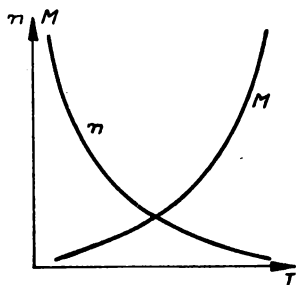


Bild 18: Drehzahl- und Drehmomentverhalten des Reihenschlußmotors

1.35 Der Nebenschlußmotor

Beim Nebenschlußmotor hat der Anlasser, wie aus der schematischen Darstellung (Bild 19) und dem Schaltbild (Bild 20) zu ersehen ist, 3 Klemmen: R, L und M, die entsprechend Bild 20 mit den Klemmen des Motors zu verbinden sind. Wie Sie erkennen, liegt nach dem Einschalten die Nebenschlußwicklung dauernd an der vollen Netzspannung.

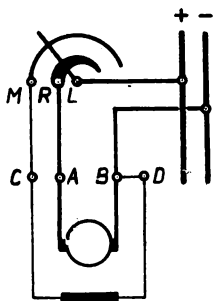


Bild 19: Anlasser für Nebenschlußmotoren

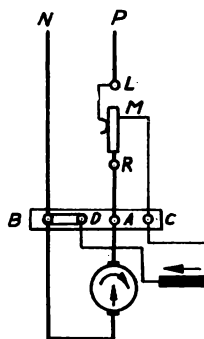


Bild 20: Schaltbild des Nebenschlußmotors

Auch beim Nebenschlußmotor gilt

$$n \approx \frac{U_K}{c \cdot \Phi}$$

Bei ihm ist der Fluß keiner Änderung unterworfen, also konstant. Man kann daher Φ mit den übrigen unveränderlichen Größen zu einer neuen Konstanten c_1 zusammenfassen und erhält damit

$$n \approx c_1 \cdot U_K$$

Das bedeutet, daß die Drehzahl des Nebenschlußmotors proportional mit der Spannung steigt. Normalerweise wird beim Nebenschlußmotor weder die Spannung noch der Fluß geändert, d.h. die Drehzahl müßte in jedem Falle konstant sein, wie es in Bild 21 durch die Linie n_0 dargestellt ist.

Bei genauer Rechnung ist der Spannungsabfall im Anker entsprechend der Gleichung

$$n = \frac{U_K - I_A \cdot R_1}{c \cdot \Phi}$$

zu berücksichtigen. Bei wachsender Belastung ist der Spannungsabfall größer als im Leerlauf, daher muß die Drehzahl abfallen. Andererseits findet durch die Ankerrückwirkung eine Schwächung des Feldes statt. Das bedeutet Anwachsen der Drehzahl. Ein vollkommener Ausgleich findet nicht statt; der Drehzahlabfall bei steigender Belastung ist jedoch gering, wie Bild 21 zeigt.

Die Drehzahl des Nebenschlußmotors ist praktisch konstant.

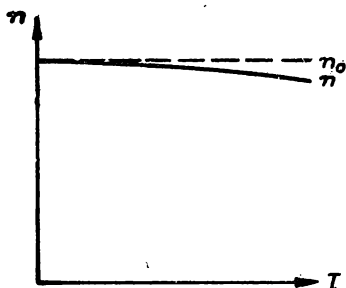


Bild 21: Drehzahlkennlinie des Nebenschlußmotors

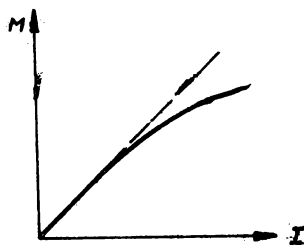


Bild 22: Drehmoment des Nebenschlußmotors

Das Drehmoment ist vom Feld und vom Ankerstrom abhängig. Bei konstantem Feld muß also das Drehmoment proportional dem Ankerstrom ansteigen, wie es Bild 22 durch die gestrichelte Linie zeigt. Mit wachsendem Ankerstrom wird aber die Ankerrückwirkung größer, das Feld daher geschwächt. Die Folge davon ist, daß das Drehmoment bei Belastung etwas sinkt (Bild 22). Vergleichen Sie den Drehmomentenverlauf des Nebenschlußmotors mit dem des Reihenschlußmotors, dann erkennen Sie:

Der Nebenschlußmotor hat beim Anlauf ein geringeres Anzugsmoment.

Der Nebenschlußmotor kommt überall dort zur Anwendung, wo keine sehr große Anzugskraft verlangt wird und wo die Drehzahl bei allen Belastungen nahezu konstant sein muß. Das ist z.B. der Fall beim Antrieb von Werkzeugmaschinen, Transmissionen usw.

1.36 Der Doppelschlußmotor

Doppelschlußmaschinen sind Nebenschlußmaschinen, die eine zusätzliche Reihenschlußwicklung haben. Der Doppelschlußmotor, dessen Schaltbild Ihnen Bild 23 zeigt, kann so ausgeführt werden, daß die Wirkung der Reihenschlußwicklung die der Nebenschlußwicklung übersteigt oder auch so, daß das umgekehrte Verhältnis vorhanden ist. Seine Drehzahl und sein Drehmomentverhalten ähnelt dann dem des Reihenschluß- oder des Nebenschlußmotors.

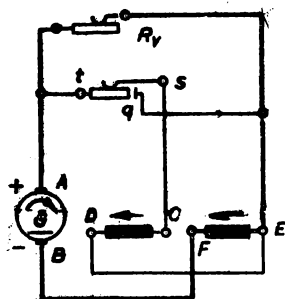


Bild 23: Schaltbild des Doppelschlußmotors

Überwiegt die Reihenschlußwicklung, dann sinkt die Drehzahl mit steigender Belastung, aber nicht so stark wie beim Reihenschlußmotor. Das Anlaufmoment ist kleiner als das des Reihenschlußmotors, doch größer als beim Nebenschlußmotor. Infolge der Nebenschlußerregung kann der Doppelschlußmotor nicht durchgehen wie der Reihenschlußmotor; seine Drehzahl ist also endlich.

Der Doppelschlußmotor mit überwiegender Reihenschlußwicklung kommt überall dort zur Anwendung, wo das Verhalten eines Reihenschlußmotors verlangt wird und ein Leerlauf möglich ist.

Bei überwiegender Nebenschlußwicklung erfolgt durch den Einfluß der Reihenschlußwicklung ebenfalls ein Drehzahlabfall bei steigender Belastung. Er ist aber um so kleiner, je weniger die Hauptstromwicklung überwiegt.

Bild 24 zeigt das Drehzahlverhalten der genannten Arten des Doppelschlußmotors.

Für Arbeitsmaschinen mit Schwungmassen, wie z.B. für Pressen, Stanzen, Schlagscheren, Walzwerke u.a., ist der Doppelschlußmotor der geeignete Antriebsmotor.

Die Schwungmasse (Schwungrad) soll infolge ihrer kinetischen Energie den Motor bei Belastungsstößen unterstützen. Das kann

sie aber nur, wenn sich ihre Drehzahl vermindert. Wäre der Antriebsmotor solcher Maschinen ein Nebenschlußmotor mit konstanter Drehzahl, dann würden die Belastungsstöße vom Motor übernommen und auf das Netz übertragen werden, während das Schwungrad untätig mitliefe.

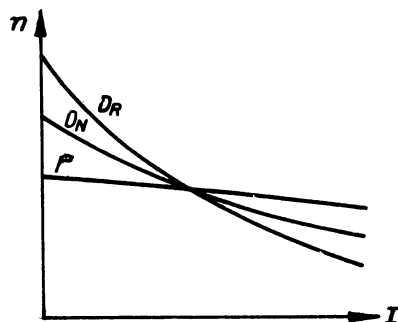


Bild 24: Drehzahlkennlinie des Doppelschlußmotors

Soll anfangs das kräftige Anzugsmoment und später die konstante Drehzahl des Nebenschlußmotors ausgenutzt werden, so schaltet man nach dem Hochfahren die Reihenschlußwicklung kurz, so daß der Motor als Nebenschlußmotor weiterläuft.

Wird das Nebenschlußfeld durch das Reihenschlußfeld unterstützt, spricht man von Auf- oder Mitkompoundierung. Deshalb tragen die Doppelschlußmaschinen auch noch die Bezeichnung "Kompoundmaschinen". Teilweise nennt man sie auch "Verbundmaschinen".

Wird durch Umschaltung der Reihenschlußwicklung das Nebenschlußfeld geschwächt, so liegt die sog. Gegenkompoundierung vor. Feldschwächung bedeutet aber Drehzahlzunahme. Daraus folgt: Ein Doppelschlußmotor kann bei Gegenkompoundierung und entsprechender Auslegung der Reihenschlußwicklung trotz zunehmender Belastung eine konstante Drehzahl beibehalten.

Zusammenfassung

Das Drehmoment eines Motors steigt bei konstantem Fluß proportional mit dem Ankerstrom I_A und bei konstantem Ankerstrom I_A proportional mit dem Fluß Φ bis zum magnetischen Sättigungspunkt.

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_A$$

In jedem Motor wird bei Drehung des Ankers in den Ankerleitern eine Gegenspannung induziert. Die Klemmenspannung U_K eines Motors ist um den inneren Spannungsabfall $I_A \cdot R_i$ des Motors größer als die Gegenspannung E_G des Motors. Der Ankerstrom wird durch einen Motor nicht von der an den Motor angelegten Spannung U_K , sondern von der Differenz $U_K - E_G$ getrieben.

Gleichstrommotoren dürfen - mit Ausnahme der Kleinstmotoren - bei stillstehendem Anker nicht an die volle Netzspannung gelegt werden, weil durch Fehlen der Gegenspannung unzulässig hohe Ströme auftreten. Es ist deshalb ein Anlasser in den Ankerstromkreis zu schalten.

Das Anlassen muß langsam, das Stillsetzen kann schnell erfolgen.

Der Reihenschlußmotor ändert seine Drehzahl stark mit der Belastung. Im Leerlauf geht er durch. Der Reihenschlußmotor hat eine hohe Anzugskraft; sein Drehmoment steigt mit der Drehzahl.

Der Nebenschlußmotor hat bei allen Belastungen praktisch dieselbe Drehzahl. Sein Anlaufmoment ist geringer als das des Reihenschlußmotors; sein Drehmoment ist nahezu der Belastung proportional.

Der Doppelschlußmotor hat ein größeres Anlaufmoment als der Nebenschlußmotor, doch kein so großes wie der Reihenschlußmotor. Seine Drehzahl ändert sich mit der Belastung, doch nicht so stark wie die des Reihenschlußmotors. Bei Leerlauf geht er nicht durch.

Man unterscheidet je nach Schaltung der Reihenwicklung: Mit- und Gegenkompondierung.

Ü b u n g e n

16. Weshalb darf ein Gleichstrommotor nicht an die volle Netzspannung gelegt werden?
17. Ein Reihenschlußmotor hat eine Leistung von 10 kW und einen Wirkungsgrad von 85%. Die Netzspannung beträgt 220 V. Der Einschaltstrom soll um 50% größer sein als der Nennstrom des Motors. Der Spannungsabfall durch den Anker- und Erregerwiderstand wird bei Nennlast zu 12% der Nennspannung angenommen. Wie groß muß der Ankerwiderstand sein?
18. Der Anlaufstrom bei einem 11 kW-Motor ist 85 A. Die Netzspannung ist 220 V. Der Widerstand des Ankers wurde zu 0,5 Ω ermittelt.
 - 18.1. Wieviel Ohm muß der Anlaßwiderstand haben?
 - 18.2. Dem Motor wurde irrtümlicherweise ein Anlasser für einen Motor für 11 kW und 110 V vorgeschaltet. Wie hoch ist die Stromstärke beim Einschalten des Motors?
 - 18.3. Welche Folgerung ergibt sich aus 18.2.?
19. Warum darf zum Antrieb einer Arbeitsmaschine mittels Riemens ein Reihenschlußmotor nicht verwendet werden?
20. Erläutern Sie das Drehmomentverhalten eines Reihenschlußmotors!
21. Wie ändert sich die Drehzahl des Nebenschlußmotors mit der Belastung?
22. Wie ist es zu erklären, daß der Nebenschlußmotor ein kleineres Anlaufmoment als der Reihenschlußmotor entwickelt?
23. Während des Betriebes eines Nebenschlußmotors wird die Leitung der Erregerwicklung unterbrochen. Welche Folge hat das?
24. Weshalb kann ein Doppelschlußmotor bei Leerlauf nicht durchgehen?

1.4 Die Drehzahländerung der Motoren

1.41 Drehzahländerung mit Regelanlasser

Sie haben kennengelernt, daß die Drehzahl entsprechend der Gleichung

$$n = \frac{U_K}{c \cdot \Phi}$$

einmal von der Klemmenspannung am Anker und zum anderen von der Stärke des Feldes abhängt. Die Spannung am Anker eines Nebenschlußmotors ist z.B. durch einen vor den Anker geschalteten Regelwiderstand leicht zu verändern. Im Widerstand tritt ein Spannungsabfall $R \cdot I$ auf; der Anker liegt dann an der Spannung $U - R \cdot I$ (Bild 20).

Der Widerstand, der gleichzeitig als Anlasser dient, heißt Regelanlasser. Im Gegensatz zum einfachen Anlasser, der nur für kurzzeitige Belastung gebaut ist, muß dieser Anlasser so ausgeführt sein, daß die einzelnen Widerstandsstufen dauernd belastet werden können.

Diese Art der Drehzahländerung stellt zwar ein einfaches Mittel dar, die Drehzahl unter die Nenndrehzahl zu bringen, hat aber den Nachteil, daß ein entsprechend großer Teil der aus einem Netz entnommenen Arbeit im Widerstand nutzlos in Wärme umgesetzt wird. Um z.B. die halbe Nenndrehzahl zu erhalten, muß die Hälfte der Netzspannung im Widerstand vernichtet werden, und damit wird auch die Hälfte der elektrischen Arbeit in Wärme umgewandelt. Aus diesem Grunde wird die Drehzahländerung mittels Regelanlasser wenig angewendet. Sie kommt nur bei Motoren kleinerer Leistungen in Betracht.

1.42 Drehzahländerung durch Feldänderung

Daß bei konstanter Spannung und einem schwachen Feld der Motor mit großer, bei einem starken Feld aber mit kleiner Drehzahl läuft, ist Ihnen aus 1.34 und 1.35 bekannt. Schaltet

man also in den Erregerstromkreis einen Regelwiderstand, so kann man leicht die Erregerstromstärke und damit das Feld und die Drehzahl des Motors verändern.

Weil bei der Nenndrehzahl das Eisen des Motors bereits gesättigt ist, kann eine Verminderung der Drehzahl durch Feldverstärkung nicht erfolgen. Durch Feldschwächung ist es aber möglich, die Drehzahl über die Nenndrehzahl stufenlos zu verändern. Bild 25 zeigt die Schaltung eines Nebenschlußmotors mit Anlasser und Feldregler. Letztere können auch im Feld-Regelanlasser (Bild 26) vereint sein. Beachten Sie, daß der Feldregler nicht ausschaltbar sein darf, weil sonst der Erregerstromkreis unterbrochen wird.

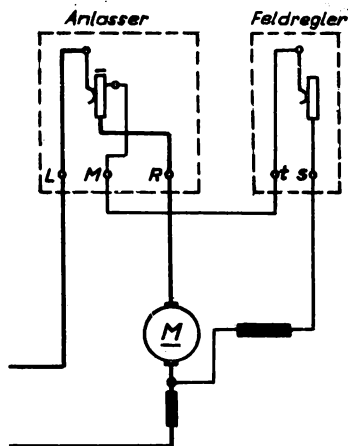


Bild 25: Nebenschlußmotor mit Anlasser und Feldregler

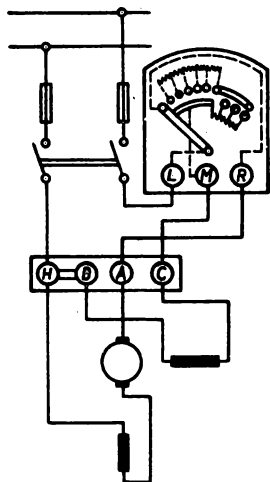


Bild 26: Nebenschlußmotor mit Feldregelanlasser

Der Steigerung der Drehzahl sind mechanische und elektrische Grenzen gesetzt. Die Fliehkräfte dürfen bestimmte Werte nicht überschreiten, wenn der Anker nicht gefährdet werden soll; andererseits wird bei großen Drehzahlen die Stromwendung immer schwieriger. Außerdem erfolgt eine starke Zunahme des Ankerstromes, sofern mit gleichbleibendem Drehmoment gefahren wird. Dies führt

zu einer thermischen Überbelastung des Motors. Deshalb ist nach den VDE-Vorschriften eine Erhöhung der Drehzahlen über 20% der Nenndrehzahl unzulässig.

Die Drehzahländerung mit Feld-Regelanlasser kommt bei Nebenschluß- und Doppelschlußmotoren zur Anwendung (Bild 27).

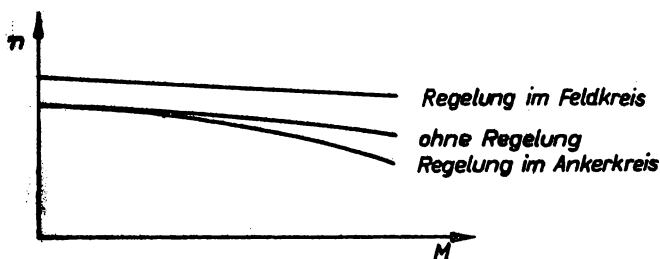


Bild 27: Drehzahlkennlinien eines Nebenschlußmotors bei Regelung

Beim Reihenschlußmotor kann eine Drehzahländerung durch Feldschwächung erfolgen, wenn zu seiner Erregerwicklung ein Regelwiderstand parallel geschaltet wird (Bild 28).

Der Ankerstrom I_A teilt sich in den durch die Erregerwicklung fließenden Strom I_{err} und den durch den Widerstand fließenden Strom I_R . Nach den Gesetzen der Stromverzweigungen ist Ihnen bekannt, daß sich die Teilströme I_{err} und I_R umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände verhalten. Je kleiner also der Widerstand R gemacht wird, um so mehr wird das Feld geschwächt, die Drehzahl somit erhöht.

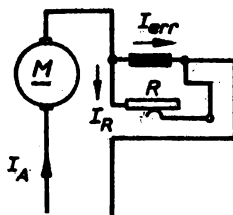


Bild 28: Drehzahlregelung des Reihenschlußmotors

1.43 Die Leonardschaltung

Um die Drehzahl weitgehend ändern zu können, wird die Leonard-

schaltung benutzt. Hier sind besondere Regelsätze notwendig. Ein solcher Regelsatz besteht aus einem Gleichstromgenerator, dem sog. Steuerdynamo, der mit einem Motor direkt gekuppelt ist, und dem Arbeitsmotor, dessen Drehzahl verändert werden soll. Der Arbeitsmotor ist immer eine fremderregte Maschine, die ihren Strom ohne Einfügung von Sicherungen, Schaltern und Anlassern vom Steuerdynamo erhält, der ebenfalls fremderregt ist. Die Erregerstromstärke dieses Generators ist durch einen Nebenschlußregler von Null bis auf ihren vollen Wert veränderbar. Die Feldwicklung des Arbeitsmotors liegt direkt an der Erregerstromquelle, so daß der Arbeitsmotor dauernd voll erregt ist und ein konstantes Feld besitzt (Bild 29.)

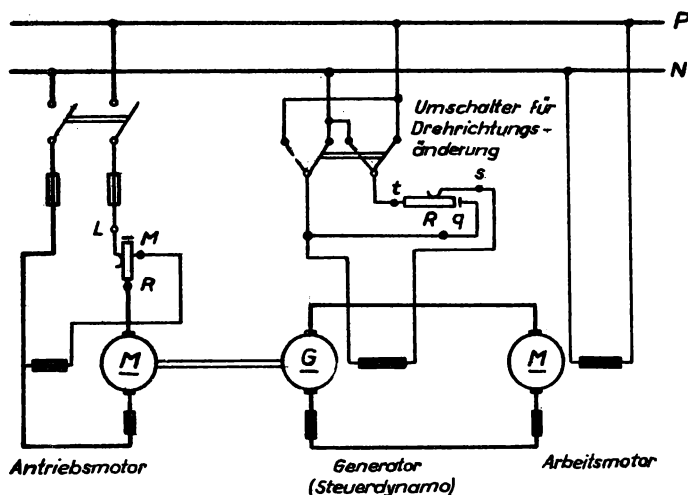


Bild 29: Leonardschaltung

Durch Änderung der Erregerstromstärke des Generators ändert sich die Generatorspannung und damit die Spannung am Anker des Arbeitsmotors. Das bedeutet aber nichts anderes als eine Änderung der Drehzahl.

Durch Änderung der Erregung des Generators läßt sich also die Drehzahl der Arbeitsmaschine von Null bis zu ihrer vollen Nenn-drehzahl beliebig verändern. Soll die Drehrichtung des Arbeitsmotors umgekehrt werden, so geschieht das durch Umschaltung des Erregerstromes für den Steuergenerator. Dadurch wird dem Arbeitsmotor der Ankerstrom in entgegengesetzter Richtung zugeführt. Bei großen Leistungen sind auch meist große Massen zu beschleunigen. Nach dem Abschalten würde infolgedessen der "freie Auslauf" viel zu lange dauern. Deshalb ist ein Abbremsen nötig. Das geschieht einfach durch Verkleinern der Spannung am Generator. Während der Motor unter der Wirkung der Schwunghmassen noch seine alte Drehzahl beibehält, wird die Gegenspannung des Motors größer als die Ankerspannung des Steuergenerators. Der Motor geht in den Generatorbetrieb über, während der Steuergenerator zum Motor wird. Die Stromrichtung kehrt sich um, der Motor entwickelt ein negatives Moment, also ein Bremsmoment.

Der Motor zum Antrieb des Generators kann ein Gleich- oder Drehstrommotor sein, je nach dem zur Verfügung stehenden Netz. Ist ein Gleichstrom-Netz vorhanden, dann dient es gleichzeitig als Spannungsquelle für die Erregung des Generators und des Arbeitsmotors. Steht ein Drehstrom-Netz zur Verfügung, dann ist für die Erregung noch eine Erregerstrommaschine (ein Gleichstromgenerator) nötig.

Die Leonardschaltung wird dort angewendet, wo Motoren größerer Leistung längere Zeit mit vermindelter Nenndrehzahl betrieben und wo diese verringerte Nenndrehzahl möglichst konstant gehalten werden muß. Das ist z.B. der Fall bei Antriebsmotoren für Druckmaschinen.

Bei großen Kranen, in Walzwerken, in dieselelektrischen Triebwagen u.a., also bei Antrieben, die starke Belastungsstöße aufweisen, wird zum Ausgleich derselben zwischen Motor und Generator des Leonardsatzes ein Schwungrad - das sog. Illgner-rad - angebracht.

1.44 Die Umkehr der Drehrichtung bei Gleichstrommotoren

Sie wollen die Bewegungsrichtung eines in einem Magnetfeld beweglich angeordneten stromdurchflossenen Leiters verändern. Wie kann das geschehen?

Sie finden 2 Möglichkeiten, nämlich:

1. Umkehr der Stromrichtung im Leiter und
2. Umkehr der Feldrichtung.

Hieraus folgt: Soll bei einem Motor die Drehrichtung geändert werden, so ist entweder die Stromrichtung im Anker oder die Richtung des Feldes umzukehren, d.h. der Anker oder die Erregerwicklung ist umzupolen. Durch einfaches Vertauschen der beiden Zuleitungen ändert sich die Drehrichtung nicht. Bei Motoren mit Wendepolen gehört die Wendepolwicklung mit zum Anker, weil sie zur Stromwendung dient. Zur Vermeidung von Irrtümern ist daher bei solchen Maschinen nur die Klemme H der Wendepolwicklung zum Klemmbrett der Maschine geführt. Die Klemmen B und G sind innerhalb der Maschine verbunden.

Die Umkehr des Drehsinnes erfolgt demnach durch Umpolen der Klemmen

- A - B des Ankers oder E - F der Erregerwicklung beim Reihenschlußmotor,
- A - B des Ankers oder C - D der Erregerwicklung beim Nebenschlußmotor,
- A - B des Ankers oder C - D der Erregerwicklung und E - F beim Doppelschlußmotor.

Bei Motoren, deren Drehsinn häufig wechselt, muß das Umkehren durch Vertauschen der Ankeranschlußwicklungen erfolgen. Warum?

Zusammenfassung

=====

Die Drehzahländerung bei Gleichstrommotoren kann erfolgen durch Änderung der Spannung an den Ankerklemmen oder durch Änderung des magnetischen Feldes.

Die Drehzahlreglung durch Spannungsänderung ist möglich mit

Regelanlasser oder mit Hilfe der Leonardschaltung.

Die Drehzahländerung mit Regelanlasser ist unwirtschaftlich.

Sie kommt nur bei Motoren mit kleinerer Leistung in Frage.

Die Leonardschaltung ermöglicht feinste Drehzahländerung. Der Regelsatz besteht aus einem Antriebsmotor, einem Steuerdynamo und einem Arbeitsmotor; bei Drehstrom-Anschluß noch aus einer Erregermaschine.

Durch Feldschwächung kann die Drehzahl normalerweise bis zu 20% über die Nenn Drehzahl stufenlos geändert werden.

Die Drehzahländerung bei Nebenschluß- und Doppelschlußmotoren erfolgt mit Hilfe der Feld-Regelanlasser oder der Feldregler. Der Feldregler darf nicht ausschaltbar sein.

Bei Reihenschlußmotoren dient zur Feldschwächung ein der Erregerwicklung parallel geschalteter Regelwiderstand.

Die Umkehr der Drehrichtung bei Gleichstrommotoren erfolgt entweder durch Umpolen des Ankers oder durch Umpolen der Erregerwicklung.

Ü b u n g e n

25. Welchen Nachteil hat die Drehzahländerung mit einem Regelanlasser?
26. Welchem Zweck dient die Leonardschaltung?
27. Wie kann die Drehzahl eines Reihenschlußmotors verändert werden?
28. Warum kann bei Nebenschlußmotoren die Drehzahl durch den Feld-Regelanlasser nur über der Nenn Drehzahl verändert werden?
29. Warum ist bei Änderung des Drehsinnes einer Wendepolmaschine nicht nur die Stromrichtung im Anker, sondern auch die in der Wendepolwicklung umzukehren?
30. Wie kann die Drehrichtung eines Doppelschlußmotors mit Wendepolen geändert werden?

1.5 Bauformen, Schutzarten und Kühlung elektrischer Maschinen

1.51 Bauformen elektrischer Maschinen

Hinsichtlich des äußeren Baues unterscheidet man bei den Motoren und Generatoren Maschinen mit Schildlagern (Bild 3) und Maschinen mit Stehlagern (Bild 4). Maschinen kleinerer und mittlerer Leistung sind mit Lagerschildern versehen. Größere Maschinen sind mit Rücksicht auf die Montage und Demontage mit Stehlagern ausgerüstet.

Um umständliche Beschreibungen zu vermeiden, werden die Bauformen der elektrischen Maschinen nach DIN 42939 und 42950 durch Kurzzeichen - einem großen Buchstaben mit Kennziffer - angegeben. Es bedeuten die Buchstaben

A	Maschinen ohne fest angebaute Lager	}	waage- rechte Anordnung
B	" mit Schildlager		
C	" mit Schild- und Stehlager		
D	" mit Stehlager		
V	" mit senkrechten Wellen		
MG	Motorgeneratoren	}	mit waagerech- ten Wellen
U	Umformer		

Eine Kennziffer zu diesen Buchstaben gibt Auskunft über die Befestigung der Maschine. Bild 30 zeigt Ihnen eine Zusammenstellung der gebräuchlichsten Bauformen elektrischer Maschinen. Wie Sie aus dieser Zusammenstellung ersehen, bedeutet z.B. die Bezeichnung B 5 eine Maschine mit 2 Schildlagern, freiem Wellenstumpf, Befestigungsflansch, ohne Füße.

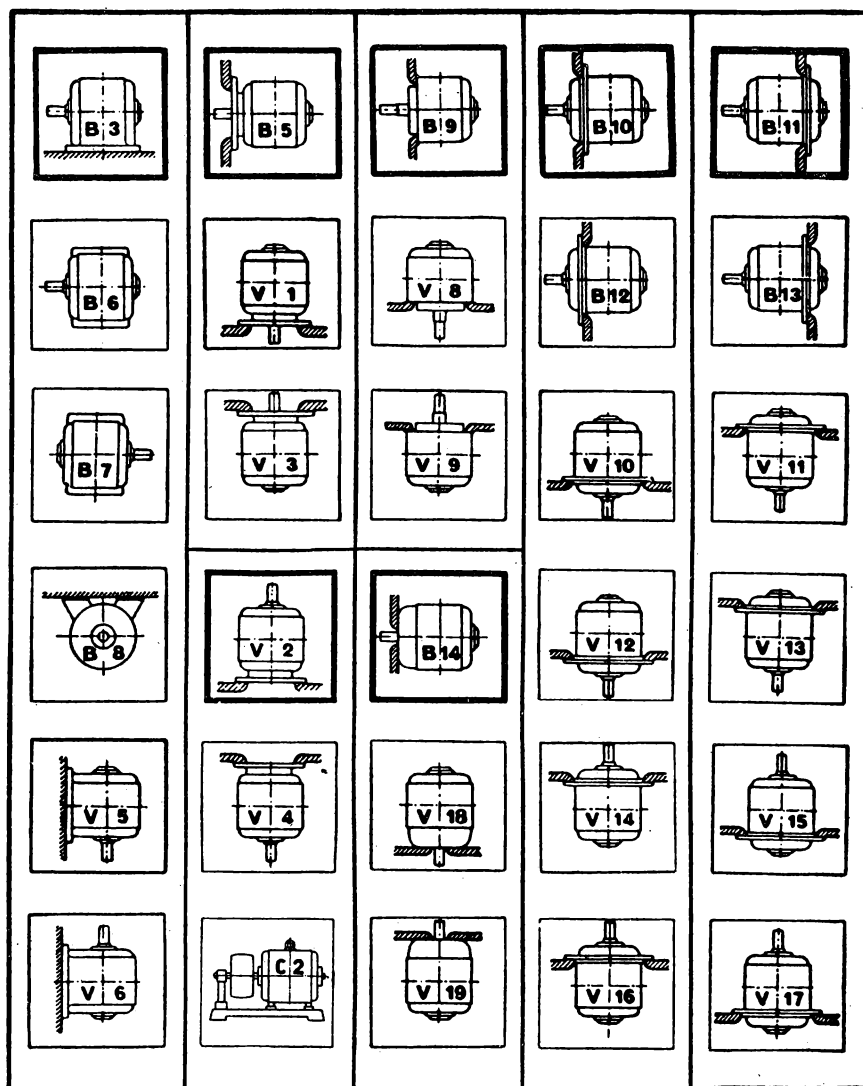


Bild 30: Bauformen elektrischer Maschinen

1.52 Schutzarten bei elektrischen Maschinen

Bei elektrischen Maschinen und Geräten ist es besonders wichtig, daß Unfälle durch unabsichtliche oder auch durch beabsichtigte Berührung spannungsführender Teile verhindert werden. Sie wissen, welche Folgen der Ausfall auch nur einer Arbeitskraft für kürzere oder längere Zeit für unsere Gesellschaft hat.

Empfindliche Betriebsstörungen können durch Eindringen von Fremdkörpern, wie z.B. Staub, Späne, Wasser, Säure- und Laugendämpfe oder explosible Gasgemische in das Innere der Maschinen und Geräte entstehen. Deshalb ist es notwendig, einen entsprechenden Schutz vorzusehen. Bei den elektrischen Maschinen ist er vom jeweiligen Antrieb und dem Aufstellungsort abhängig.

Nach DIN 40050 bzw. 51170 unterscheidet man zwischen allgemeinen und Sonderschutzarten. Zu den allgemeinen Schutzarten gehört der Schutz gegen Berührung, gegen Eindringen fester Fremdkörper und der Schutz gegen Eindringen von Wasser. Zu den Sonderschutzarten gehört der Explosions- und Schlagwetter-schutz.

Zur einheitlichen Kennzeichnung der Schutzart sind in den Normen Kurzzeichen festgelegt. Diese setzen sich bei den allgemeinen Schutzarten aus dem Buchstaben P und zwei Kennziffern zusammen. Die erste Ziffer bezeichnet die Schutzart, die zweite gibt Auskunft über den "Wasserschutz". Hierunter ist zu verstehen:

- "Ohne Wasserschutz": Das Eindringen von Wasser ist verhindert.
- "Tropfwasserschutz": Spannungsführende und innere bewegte Teile sind gegen schädigende Einwirkungen senkrecht fallender Wassertropfen geschützt.
- "Spritzwasserschutz": Spannungsführende und innere bewegte Teile sind gegen schädigende Einwirkungen von Wassertropfen oder Wasserstrahlen ohne besonderen Druck aus beliebiger Richtung (also auch von unten) geschützt.

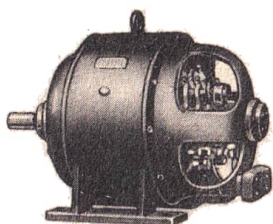
Schutzarten nach DIN 40050

<p align="center">Kurzzeichen für Schutzarten elektrischer Maschinen, Schaltgeräte und Transformatoren</p>			Wasserschutz					
			ohne Wasserschutz	Tropfwasserschutz	Spreng- und Spritzwasserschutz senkrechte und schräge Richtung bis 30° über der Waagerechten	Spreng- und Spritzwasserschutz aus allen Richtungen	Spritz- und Schwallwasserschutz	Druckwasserschutz
Berührungsschutz	Fremdkörper-schutz	Kenn-ziffer	.0	.1	.2	.3	.4	.5
ohne Berührungsschutz	ohne Schutz gegen feste Fremdkörper	0.	P00	P01	—	—	—	—
gegen groß-flächige Be-rührung mit der Hand	gegen große feste Fremdkörper	1.	P10	P11	P12	—	P14	—
gegen Berüh-rung mit den Fingern	gegen mittel-große feste Fremdkörper	2.	P20	P21	P22	—	—	—
gegen Berüh-rung m. Werk-zeug oder ähnlichem	gegen kleine feste Fremdkörper	3.	P30	—	P32	P33	—	—
gegen Berührung mit Hilfs-mitteln jeder Art	gegen schädliche Staubablagerung im Innern	4.	—	—	—	P43	P44	—
	vollkommener Schutz gegen Staub	5.	—	—	—	—	P54	P55

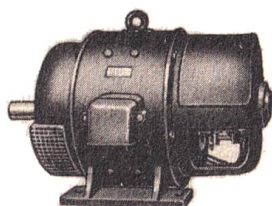
Die *fettgedruckten* Kurzzeichen (P00, P12 usw.) gelten vornehmlich für elektrische Maschinen. Von den Zusatzbuchstaben vor der Schutzartbezeichnung bedeutet:

d druckfeste Kapselung, **p** Plattenschutzkapselung, **o** Ölkapselung, **f** Fremd-belüftung, **e** erhöhte Sicherheit

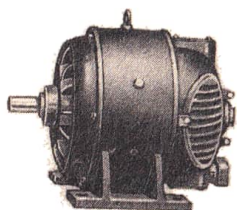
Bild 31: Schutzarten



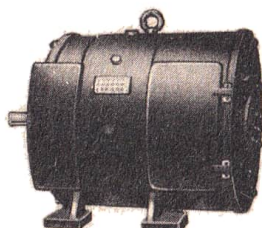
a) Offener Motor
Schutzart P 00



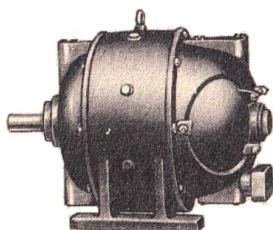
b) Offener Motor mit
Tropfwasserschutz
Schutzart P 01



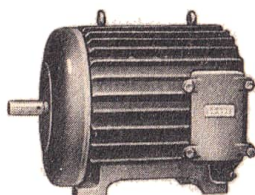
c) Tropfwassergeschützter
Motor
Schutzart P 11



d) Schwallwassergeschütz-
ter Motor
Schutzart P 23



e) Geschlossener Motor mit
Rohranschluß für die
Kühlluft
Schutzart P 33



f) Geschlossener Motor
mit Außenbelüftung
Schutzart P 33

Bild 32: a - f: Motoren mit verschiedenen Schutzarten

Bild 31 zeigt Ihnen eine Zusammenstellung der allgemeinen Schutzarten. Die Sonderschutzarten werden noch durch Zusatz der kleinen Buchstaben e (Explosionsschutz) und m (Schlagwetterschutz) gekennzeichnet.

Die Bilder 32 a - f zeigen Ihnen Ausführungen von Motoren mit verschiedenen Schutzarten.

1.53 Kühlung elektrischer Maschinen

Vergleicht man die Leistung eines offenen Motors mit der eines vollkommen gekapselten Motors gleicher Größe, dann muß man feststellen, daß die des gekapselten Motors um 30 - 40 % kleiner ist als die des offenen. Wodurch ist das begründet? Sie haben recht, wenn Sie die Ursache in der Erwärmung suchen. Um die Isolation der Maschine nicht zu gefährden, darf ja die Temperatur eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Es ist also wichtig, die in der Maschine entstandene Wärme abzuführen. Das geschieht durch die Kühlung, die meist mittels Luft, seltener mit Wasser erfolgt. Um gute Kühlung zu erreichen, sind, wie schon in 1.12 erwähnt, die Blechpakete des Ankers - bei den Wechselstrommaschinen auch die des sog. Ständers - mit entsprechenden Kühlschlitzen versehen, durch die die Kühlluft getrieben wird.

Man unterscheidet: Selbstkühlung, Eigenbelüftung, Fremdbelüftung, Wasserkühlung und Kühlung mit Wasserstoff.

Bei der Selbstkühlung wird die Kühlluft nur durch die umlaufenden Teile der Maschine bewegt. Ein besonderer Lüfter ist nicht vorhanden. Diese Art der Kühlung kommt bei offenen Motoren kleinerer Leistung zur Anwendung.

Die Eigenbelüftung wendet man am meisten an. Ein am Läufer angebrachter oder von ihm angetriebener Lüfter bewegt die Kühlluft. Der Lüfter ist so gebaut, daß er in beiden Drehrichtungen wirksam ist. Bei Motoren größerer Leistung sind häufig 2 Lüfter auf der Motorwelle vorhanden. Geschlossene Motoren haben häufig Oberflächenkühlung. Bei ihnen ist das Gehäuse meist

mit Rippen versehen.

Motoren, die in Räumen aufgestellt werden, in denen die Zuführung einwandfreier Frischluft zur Kühlung nicht ohne weiteres möglich ist, erhalten Rohranschlußstutzen, die durch Rohre mit einem staubfreien Raum verbunden sind. Eine Führung der Rohre ins Freie sollte vermieden werden, da sich dadurch im Motor Feuchtigkeit niederschlagen kann.

Unter Fremdbelüftung versteht man die Zuführung von Kühlluft durch einen mit eigenem Antriebsmotor ausgerüsteten Lüfter. Diese Art der Belüftung wird nur bei solchen Maschinen angewandt, wo die Leistung des Eigenlüfters nicht mehr ausreicht.

Die Wasserkühlung wird seltener angewandt. Bei ihr werden nicht nur die Maschinen allein, sondern auch die Lager durch fließendes Wasser gekühlt.

Bei sehr großen Generatoren erfolgt die Kühlung durch Wasserstoffgas.

Zusammenfassung

=====

Die Bauformen elektrischer Maschinen sind genormt und werden durch Kurzzeichen - einem großen Buchstaben mit Kennziffer - angegeben.

Um Unfälle und Betriebsstörungen zu vermeiden, werden elektrische Maschinen mit einem Schutz gegen äußere Einwirkungen versehen.

Die allgemeine Schutzart wird durch den Buchstaben P in Verbindung mit 2 Kennziffern angegeben. Die erste Ziffer gibt den Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper und Staub, die zweite den Schutz gegen Wasser an.

Sonderschutzarten sind Explosions- und Schlagwetterschutz.

Die Leistung der elektrischen Maschinen ist wesentlich von der Maschinentemperatur abhängig, die eine bestimmte Grenz-

temperatur nicht überschreiten darf. Deshalb müssen die Maschinen gekühlt werden.

Man unterscheidet: Selbstkühlung, Eigenbelüftung, Fremdbelüftung, Wasserkühlung und Kühlung mit Wasserstoffgas.

Ü b u n g e n

31. Geben Sie die Bedeutung der Bezeichnung "Form B 3, P 22" an!
32. Was bedeutet die Kennzeichnung "P 00, Klemmen P 21" ?
33. Welchen Einfluß hat die Umgebungstemperatur einer elektrischen Maschine auf ihre Belastungsfähigkeit?
34. Welcher Unterschied besteht zwischen Eigenbelüftung und Fremdbelüftung einer Maschine?

ANTWORTEN UND LÖSUNGEN

1. Das Magnetgestell besteht aus dem Magnetgehäuse oder Joch und den Polen.
2. In jedem in einem Feld bewegten Leiter werden Spannungen induziert. Da jedes Blech eine kurzgeschlossene Leiterschleife darstellt, fließen in ihm durch die induzierte Spannung getriebene Wirbelströme. Diese Wirbelströme sind um so kleiner, je kleiner der vom Leiter maximal umfaßte Fluß wird und je größer der elektrische Widerstand des Materials ist. Beides - kleinerer umfaßter Fluß und größerer elektrischer Widerstand - wird durch das Zusammensetzen des Ankerkörpers aus Blechen erreicht.
3. Infolge schlechter Befestigung der Bürstenbrücke ist sie durch die Reibungskraft der Bürsten auf dem Stromwender in Richtung des Ankerdrehsinnes verschoben worden. Die Bürstenbrücke muß wieder in die neutrale Zone zurückgedreht und unverrückbar befestigt werden.
4. Die Wendepole begünstigen die Stromwendung, indem sie ein Feld erzeugen, das dem Ankerquerfeld entgegengerichtet ist. Dadurch ist eine Bürstenverschiebung bei Laständerung unnötig.
5. Das Feld der Wendepole steigt und fällt mit der Stärke des Ankerfeldes. Das Querfeld trifft daher stets auf ein entsprechend starkes Gegenfeld, die Ankerrückwirkung wird also aufgehoben.
6. Bei der Reihenschlußmaschine fließt der gesamte Ankerstrom durch die Erregerwicklung. Bei der Nebenschlußmaschine sind Erregerstromkreis und Ankerstromkreis nebeneinander geschaltet, so daß nur ein kleiner Strom durch die Erregerwicklung fließt.
7. Man unterscheidet:
 1. Maschinen mit Fremderregung. Die Erregerwicklung ist

an eine fremde Spannungsquelle, z.B. eine Akkumulatoren-
batterie, angeschlossen.

2. Maschinen mit Selbsterregung. Die Feldwicklung ist entweder parallel oder in Reihe mit dem Anker der Maschine geschaltet.
3. Maschinen mit Eigenerregung. Die Feldwicklung erhält den Erregerstrom aus einem mit ihr mittelbar oder unmittelbar gekuppelten Generator.
8. Fremderregter Generator: Anker A - B, Feldwicklung J - K
Nebenschlußmaschine: Anker A - B, Feldwicklung C - D
Reihenschlußmaschine: Anker A - B, Feldwicklung E - F.
9. Bei einer Maschine mit Wendepolen ist immer eine Klemme mit dem Buchstaben H vorhanden. Die andere Klemme G der Wendepolwicklung ist im Gehäuse der Maschine mit der Ankerklemme B verbunden.
10. Beim Abschalten eines Stromkreises mit hoher Induktivität entsteht eine sehr hohe Selbstinduktionsspannung, die die Isolation gefährdet. Durch den Unterbrechungsfunken würde der Unterbrechungskontakt des Reglers zerstört. Durch den Kurzschlußkontakt klingt der Selbstinduktionsstrom schnell ab.
11. Infolge des remanenten Magnetismus gibt ein Gleichstrom-generator bei abgeschaltetem Erregerstrom Spannung.
12. Bei Kurzschluß der Ankerklemmen ist der Ankerstrom unzulässig hoch.
13. Bei wachsender Belastung fällt die Klemmenspannung des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators zunächst langsam, dann schneller, bis bei einer bestimmten Belastungsstromstärke, die wesentlich größer als die Nennstromstärke ist, sich der Generator nicht mehr selbst erregt und die Klemmenspannung auf Null sinkt.
14. Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator verliert bei Kurzschluß seinen Erregerstrom. Er hat einen geringen, nur durch das remanente Feld verursachten Kurzschlußstrom.

15. Verbraucherwiderstand R_V und Widerstand der Erregerwicklung liegen parallel. $R_K = 4,8 \Omega$.

Ankerwiderstand liegt mit R_K in Reihe. $R_{ges} = 4,85 \Omega$.

15.1. $I_A = \sim 82,5 \text{ A}$

15.2. $U_K = 395,88 \text{ V}$

15.3. $I_{err} = 3,3 \text{ A}$

15.4. $I = 79,1 \text{ A}$

16. Der Ankerwiderstand ist klein, bei Stillstand des Ankers ist keine Gegenspannung vorhanden, daher würde ein unzulässig hoher Strom durch ihn fließen, der die Maschine gefährdet.

17. $M_{zu} = 11800 \text{ W}$

Nennstrom $I = 53,6 \text{ A} = \sim 54 \text{ A}$.

Anlaufstrom $I_A = 81 \text{ A}$

$R = 2,72 \Omega$

innerer Spannungsabfall des Motors $U_V = 26,4 \text{ V}$

innerer Widerstand $R_1 = 0,48 \Omega$

$R_w = 2,24 \Omega$

18. 1. $R_w = \frac{U_K}{I_A} - R_A = \frac{220 \text{ V}}{85 \text{ A}} - 0,5 \Omega = 2,09 \Omega$

2. $R = \frac{U^2}{P} = \frac{110^2 \text{ V}^2}{11000 \text{ W}} = 1,1 \Omega$

$I = \frac{U_K}{R} = \frac{220 \text{ V}}{1,1 \Omega} = 200 \text{ A}$

3. Da die Stromstärke zu hoch ist, würde der Anlasser unzulässig hoch belastet werden und verschmoren.

19. Reißt der Riemen oder fällt er ab, dann läuft der Motor leer. Die Stromaufnahme wird geringer, das Feld schwächer. Um die entsprechende Gegenspannung zu erzeugen, muß sich der Anker schneller drehen. Durch Anwachsen der Gegenspannung wird aber wiederum das Feld geschwächt, die Drehzahl wieder höher usw. Der Anker geht durch.

20. Das Drehmoment steigt mit zunehmender Stromstärke und ist, wie aus dem Drehzahl-Drehmomentschaubild hervorgeht, um so größer, je größer die Drehzahl ist.
21. Die Drehzahl des Nebenschlußmotors bleibt bei allen Belastungen praktisch konstant. Ein geringes Absinken der Drehzahl tritt durch den größeren Spannungsabfall im Anker bei Belastung ein.
22. Das Feld ist beim Nebenschlußmotor konstant, es ändert sich nur der Belastungsstrom. Das Drehmoment ist aber vom Feld und vom Strom abhängig. Beim Hauptschlußmotor ist sowohl das Feld als auch der Ankerstrom beim Anlauf sehr stark. Daher ist sein Anzugsmoment größer.
23. Das Feld nimmt schnell ab, daher steigt die Drehzahl an und fällt sofort wieder ab, da ohne Feld kein Drehmoment gebildet werden kann. Ohne Feld wird keine Gegenspannung induziert. Die Stromstärke wird so groß, daß die Sicherungen durchbrennen.
24. Die Nebenschlußerregewicklung liegt auch bei Leerlauf an der Netzspannung. Es ist also im Leerlauf ein so starkes Feld vorhanden, daß sich die Drehzahl auf einem bestimmten endlichen Wert hält.
25. Die Änderung der Drehzahl mittels Regelanlasser ist mit größeren Verlusten verbunden, also unwirtschaftlich.
26. Die Leonardschaltung dient dazu, bei einem Gleichstrommotor praktisch verlustlos und stufenlos die Drehzahl vom Nullstand bis zur Grenzdrehzahl zu ändern.
27. Die Drehzahländerung eines Reihenschlußmotors kann erfolgen 1. durch Parallelschalten eines Widerstandes zur Erregewicklung, 2. durch Regelanlasser.
28. Durch die magnetische Sättigung des Eisens kann durch Verstärkung des Erregerstromes das Feld nicht mehr so verstärkt werden, daß eine Herabminderung der Drehzahl möglich ist.

29. Durch die Wendepole soll die Ankerrückwirkung aufgehoben werden. Ist die Wendepolwicklung verkehrt gepolt, feuert der Motor bei Belastung, denn die Selbstinduktion der Ankerspulen wird dann durch die das Wendepolfeld erzeugte Spannung noch vergrößert.
30. Es sind umzupolen Anker A - B und Wendepole G - H oder die Feldwicklungen C - D und E - F.
31. Maschine mit 2 Schildlagern, freiem Wellenstumpf, mit Füßen, geschützt gegen zufällige Berührung, Eindringen kleiner fester Fremdkörper, Spritzwasserschutz.
32. Der Motor ist ohne Berührungsschutz und ohne Schutz gegen Eindringen fester Fremdkörper; die Klemmen sind geschützt gegen zufällige Berührung und gegen Eindringen kleiner fester Fremdkörper und haben Tropfwasserschutz.
33. Je höher die Raumtemperatur ist, desto weniger kann die Maschine belastet werden. Die zulässige Grenztemperatur darf nicht überschritten werden.
34. Bei der Eigenbelüftung wird der Kühlluftstrom von der Maschine selbst hervorgebracht, bei Fremdbelüftung wird die Kühlluft durch einen besonders angetriebenen Lüfter durch die Maschine getrieben.

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

SCHARF

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHELEKTRO- TECHNIKER

7

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-07/63

1963



ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 7

von

Ing. Erich Scharf

2. Auflage

Herausgeber:

Zentralstelle für Fachschulausbildung

Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 81 /63

Best.-Nr. 5030-07/63

Inhaltsverzeichnis

	Seite
2 Wechselstrommaschinen	3
2.1 Der Synchrongenerator	3
2.11 Allgemeines über Wechselstromgeneratoren	3
2.12 Der Aufbau des Drehstrom-Synchron- generators	5
2.13 Der Synchrongenerator im Leerlauf	6
2.14 Der Synchrongenerator bei Belastung	7
2.15 Die Spannungsreglung	8
2.16 Parallelbetrieb der Synchrongeneratoren	8
2.2 Der Synchronmotor	10
2.21 Das Drehfeld	10
2.22 Der Aufbau und die Wirkungsweise des Synchronmotors	12
2.23 Das Anlassen der Synchronmotoren	13
2.24 Die Erregung des Synchronmotors	13
2.3 Transformatoren	15
2.31 Die Wirkungsweise des Transformators	15
2.32 Der Aufbau des Transformators	17
2.33 Der Einphasentransformator	19
2.34 Der Drehstromtransformator	19
2.35 Das Betriebsverhalten des Transformators	22
2.36 Parallelschalten von Transformatoren	26
2.37 Der Spartransformator	28
2.38 Anwendungen	29
2.4 Asynchronmotoren	32
2.41 Der Kurzschlußläufermotor	32
2.42 Der Schlupf	34
2.43 Anlauf und Anlassen von Kurzschluß- läufermotoren	35
2.44 Der Schleifringläufermotor	41
2.45 Drehzahl- und Drehrichtungsänderung bei Asynchronmotoren	43
2.46 Der Leistungsfaktor bei Asynchronmotoren	45
2.47 Bremsung der Drehstrommotoren	45
2.5 Kommutatormotoren	49
2.51 Der Universalmotor	49
2.52 Der Drehstrom-Reihenschlußmotor	50
2.53 Der Drehstrom-Nebenschlußmotor	52

	Seite
3 Elektronische Drehzahlstellung	56
3.1 Quecksilberdampfgleichrichter	57
3.11 Wirkungsweise	57
3.12 Die Zündung	60
3.13 Die Hilfsanoden	61
3.14 Die Rückzündung	62
3.15 Die Spannungsreglung	63
3.16 Arten und Anwendungsgebiete	66
3.2 Das Thyatron oder Stromtor	68
3.21 Aufbau des Thyatrons	68
3.22 Wirkungsweise	69
3.23 Anwendung	69
Antworten und Lösungen	72

2. Wechselstrommaschinen =====

2.1 Der Synchrongenerator

2.11 Allgemeines über Wechselstromgeneratoren

Um in einem Leiter Spannungen zu erzeugen, muß eine Veränderung des ihn umgebenden Kraftfeldes erfolgen. Es ist gleichgültig, ob sich dabei der Leiter bewegt und das Feld feststeht, wie es Bild 1 im 6. Lehrbrief zeigt, oder ob der Leiter feststeht und sich das Feld bewegt. Bei den Wechselstromgeneratoren benutzt man beide Möglichkeiten zur Spannungserzeugung.

Wechselstromgeneratoren, bei denen die Wechselspannung im umlaufenden Teil - im Rotor - induziert wird, bezeichnet man als Außenpolmaschinen (Bild 1); solche, bei denen die Wechselspannung im feststehenden Teil - im Stator - entsteht, heißen Innenpolmaschinen (Bild 2).

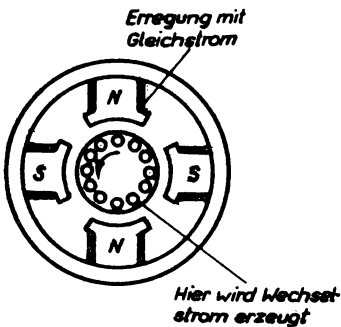


Bild 1

Prinzip d. Außenpolmaschine

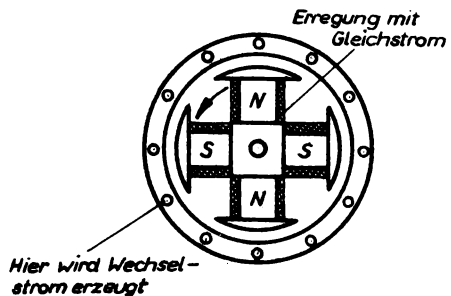


Bild 2

Prinzip der Innenpolmaschine

Sie erkennen: Bei der Außenpolmaschine enthält der Stator die Magnetpole mit Wicklungen, durch die Gleichstrom fließt, während die induzierte Wechselspannung dem Rotor über Schleifringe und Bürsten entnommen wird. Bei der Innenpolmaschine wird dem Rotor zur Erregung des Feldes Gleichstrom über Bürsten und Schleifringe zugeführt, während die induzierte Wechselspannung der Ständerwicklung entnommen wird.

Die zur Erregung der Pole benötigte Gleichstromleistung ist in jedem Falle klein. Die Spannung des Erregerstromes beträgt normalerweise 110 oder auch 220 V und wird meist einem direkt mit dem Rotor gekuppelten Gleichstromnebenschluß-Generator - der Erregermaschine - entnommen.

Außenpolmaschinen kommen nur für kleinere Leistungen und Spannungen in Frage. Generatoren für größere Leistungen und hohe Spannungen (6000 V, in Sonderfällen 15 000 V) werden nur als Innenpolmaschinen ausgeführt. Warum wohl?

Daß die Frequenz der induzierten Wechselspannung von der Drehzahl pro Minute und der Polpaarzahl des Generators abhängt, ist Ihnen bekannt. Es ist

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (1)$$

Für einen Wechselstromgenerator mit 4 Polen, also 2 Polpaaren, ergibt sich für $f = 50$ Hz eine Drehzahl

$$n = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

Bei einem 10-poligen Generator wird die Drehzahl $n = 600 \text{ min}^{-1}$. Diese Drehzahlen, die man so erhält, sind die Synchrondrehzahlen. Die Wechselstromgeneratoren müssen mit synchronen Drehzahlen laufen, wenn die Frequenz 50 Hz eingehalten werden soll. Aus diesem Grunde nennt man die Generatoren Synchrongeneratoren oder synchrone Generatoren.

Damit der in den Generatoren erzeugte Wechselstrom technisch Verwendung finden kann, muß er sinusförmig verlaufen. Verliefe der Wechselstrom nicht sinusförmig, würden Spitzen und

Sprünge auftreten, die unter anderem zu einer ruckartigen Belastung der Maschinen und der angeschlossenen Geräte führen. Außerdem würden sich die Berechnungen der Wechselstrommaschinen und Verteileranlagen äußerst schwierig gestalten. Der sinusförmige Verlauf wird durch besondere Konstruktionen und wicklungstechnische Maßnahmen erhalten.

2.12 Der Aufbau des Drehstrom-Synchrongenerators

Bei den Innenpolmaschinen besteht das Gehäuse des Stators entweder aus Gußeisen, oder es wird in Schweißkonstruktion ausgeführt. In ihm ist der Wicklungsträger befestigt, der aus einzelnen gegeneinander isolierten und mit Nuten versehenen Blechen besteht. Häufig ist das Blechpaket zur Kühlung noch mehrfach unterteilt (Bild 3). Die zur Erzeugung des Drehstromes notwendigen, um 120° versetzten 3 Spulen, Phasen oder Stränge sind in den Nuten verteilt untergebracht. Die Anfänge und Enden der Stränge sind zu dem am Gehäuse befindlichen Klemmbrett geführt.

Der Rotor oder Läufer ist entweder als Polrad mit ausgeprägten Polen (Bild 4) oder als Volltrommelläufer (Bild 5) ausgeführt. Polräder oder Einzelpollläufer, deren Pole aus einem vollen Stück bestehen oder auch aus Blechen zusammenge-

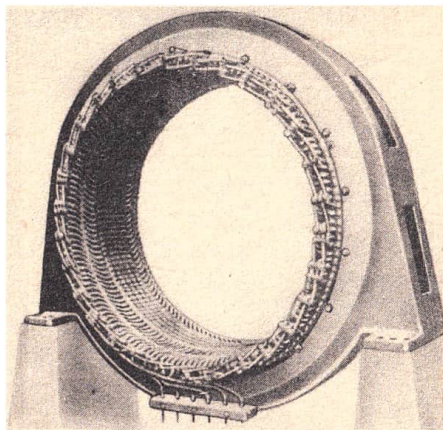


Bild 3

Kompletter Ständer eines Synchrongenerators

setzt sein können, kommen für langsam laufende Generatoren in Frage. Die Volltrommelläufer oder Induktoren finden bei Generatoren mit hohen Drehzahlen (3000 min^{-1}) Verwendung. Welle und Läuferkörper bestehen bei ihnen aus einem vollen Stück

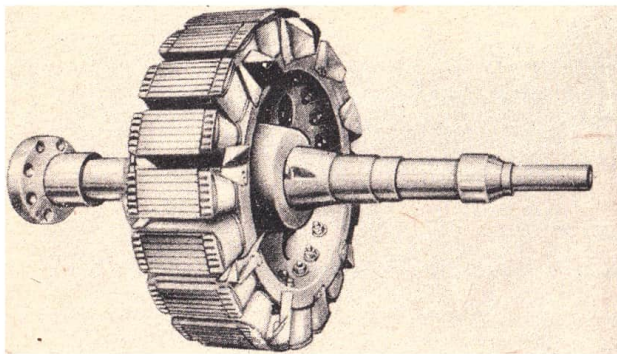


Bild 4: Polrad (mit aufgeschraubten Polen)

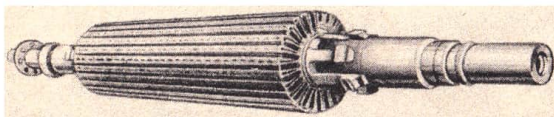


Bild 5: Gefräster Induktor eines Turbogenerators

Stahl, in das Nuten zur Aufnahme der Erregerwicklung einge-
fräst sind. Sie haben also keine ausgeprägten Pole, sind im
Durchmesser klein und in axialer Richtung lang gebaut. Die
Erregerwicklung ist mit den 2 Schleifringen verbunden.

Der Ständer der Außenpolmaschinen entspricht dem Magnetgehäu-
se der Gleichstrommaschinen, während der aus Blechen zusam-
engesetzte Läufer die 3 um 120° versetzten Strangwicklungen
aufnimmt. Die Läuferwicklung ist im Dreieck oder Stern ge-
schaltet und mit den 3 Schleifringen verbunden.

2.13 Der Synchrongenerator im Leerlauf

Die Ihnen aus 1.22 bekannte Gleichung

$$E = c \cdot \Phi \cdot n$$

gilt auch für den Synchrongenerator. Danach ändert sich die

Ursprung mit wachsendem Erregerstrom entsprechend dem Verlauf der Magnetisierungslinie, wenn die Drehzahl konstant bleibt. Wie bei den Gleichstrommaschinen wird der Anstieg der Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom durch die Leerlaufkennlinie (Bild 6) dargestellt.

Sie erkennen, daß der Generator auch Spannung gibt, wenn der Erregerstrom Null ist. Wie ist das zu erklären? Diese Spannung beträgt 2 - 5% der Nennspannung und ist nicht ungefährlich. Bei einer nicht erregten Maschine, deren Nennspannung 6000 V ist, kann die Spannung an den Klemmen also 300 V betragen.

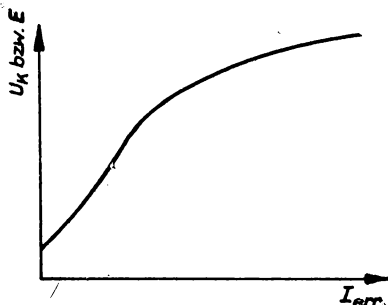


Bild 6: Leerlaufkennlinie

2.14 Der Synchrongenerator bei Belastung

Werden Drehzahl und Erregung des Generators konstant gehalten, dann ändert sich die Spannung mit zunehmender Belastung, weil durch den Belastungsstrom in den Wicklungen Spannungsabfälle hervorgerufen werden.

Der Spannungsabfall ist wesentlich von der Art der Belastung abhängig. Bei $\cos \varphi = 1$ und noch stärker bei induktiver Belastung tritt bei den Drehstromgeneratoren bei konstanter Erregung mit steigender Belastung ein wachsender Spannungsabfall auf, während mit steigender kapazitiver Belastung Spannungserhöhung verbunden ist. Bild 7

zeigt die Änderung der Spannung in Abhängigkeit von der Belastung.

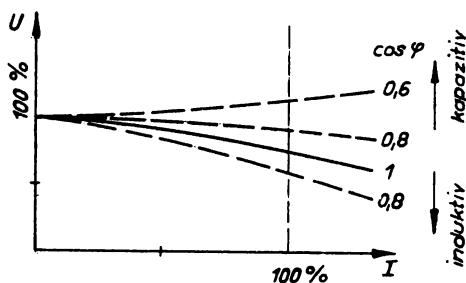


Bild 7
Spannungsabfall bei Synchrongeneratoren bei verschiedener Belastung.

2.15 Die Spannungsreglung

Soll die Klemmenspannung bei allen Belastungen konstant bleiben, dann muß je nach Art der Belastung die Erregung verstärkt oder geschwächt werden. Das geschieht in einfachster Weise bei angebauter Erregermaschine durch den Nebenschlußregler. Durch ihn wird die Erregerspannung und damit die Erregerstromstärke verändert. In kleinen Anlagen, wenn keine starken Belastungsschwankungen auftreten, erfolgt die Regelung von Hand. Im allgemeinen kommt jedoch die automatische Spannungsreglung in Frage. Sie wird durch besondere Regler, die Eil- und Schnellregler, herbeigeführt.

2.16 Parallelbetrieb der Synchrongeneratoren

Um Synchrongeneratoren parallel schalten zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. gleiche Spannungen,
2. gleiche Frequenzen,
3. Phasengleichheit; d.h. die Spannungen müssen zur gleichen Zeit ihre Höchst- und Nullwerte erreichen,
4. gleiche Drehfeldrichtungen.

Sind diese Bedingungen erfüllt, dann ist Synchronismus vorhanden. Die Generatoren können parallel geschaltet werden.

Die Drehfeldrichtung wird nur einmal kontrolliert, und zwar beim erstmaligen Parallelschalten neu aufgestellter Maschinen. Zu ihrer Bestimmung dienen die Drehfeldzeiger, deren Wirkungsweise auf dem Prinzip der später zu behandelnden Asynchronmaschinen beruht.

Durch das Parallelschalten allein gibt aber der Generator noch keine Leistung ab. Um Leistungsabgabe zu erreichen, muß die Leistung der Antriebsmaschine erhöht werden. Erfolgt z.B. der Antrieb des Generators durch eine Dampfkraftmaschine, dann ist ihr Regler auf eine größere Dampzufuhr einzustellen. Eine Änderung der Erregerstromstärke des Generators würde nur eine Änderung des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ bedingen, jedoch sich

nicht auf die Leistungsabgabe auswirken.

Um die im Netz benötigte Leistung auf die parallel geschalteten Generatoren zu verteilen, wird an jedem Generator ein Leistungsmesser angeschlossen, so daß jeder Generator entsprechend seiner Größe belastet werden kann.

Zusammenfassung

=====

Wechselstromgeneratoren werden für kleinere Leistungen als Außenpolmaschinen, für hohe Spannungen und größere Leistungen als Innenpolmaschinen hergestellt.

Bei der Außenpolmaschine enthält der Ständer oder Stator, bei der Innenpolmaschine der Läufer oder Rotor zwei oder mehr Magnetpole, deren Erregerwicklung mit Gleichstrom gespeist wird, den die Erregermaschine liefert.

Die in Wechselstromgeneratoren erzeugte sinusförmige Spannung kann nur durch besondere Konstruktion und wicklungstechnische Maßnahmen erhalten werden.

Wechselstromgeneratoren müssen, damit die Frequenz der induzierten Spannung 50 Hz beträgt, mit synchroner Drehzahl laufen.

Beim Drehstromgenerator sind die 3 Stränge um 120° versetzt und durch Stern- oder Dreieckschaltung miteinander verkettenet, in denen 3 elektrisch um 120° phasenverschobene Spannungen induziert werden.

Bei leerlaufendem Drehstromgenerator ändert sich bei zunehmender Erregung die Urspannung entsprechend der Magnetisierungslinie.

Bei gleichbleibender Drehzahl und Erregung bleibt bei Laständerung die Klemmenspannung des Generators nicht konstant. Sie fällt mit wachsender Belastung bei $\cos \varphi = 1$ und noch stärker bei induktiver Belastung, während sie bei kapazitiver Belastung steigt.

Die Spannung wird konstant gehalten, indem der Erregerstrom durch Eil- und Schnellregler automatisch geregelt wird.

Um Synchrongeneratoren parallel zu schalten, müssen Spannung, Frequenz und Phasenlage gleich sein und die Drehfelddrehrichtung übereinstimmen.

Der parallel geschaltete Synchrongenerator gibt nur dann Wirkleistung ins Netz, wenn die Leistung der Antriebsmaschine erhöht wird.

Ü b u n g e n

1. In welchen Fällen werden Wechselstromgeneratoren mit Einzelpollläufern und in welchen solche mit Induktoren angewendet? Begründen Sie Ihre Antwort!
2. Welche Vorteile hat die Innenpolmaschine gegenüber der Außenpolmaschine?
3. Was ist beim Parallelschalten eines Drehstromgenerators ans Netz zu beachten?
4. Wodurch wird der parallel geschaltete Drehstromgenerator gezwungen, Wirkleistung ins Netz zu liefern?
5. Wie wirkt sich eine Änderung der Erregung des Generators aus?

2.2 Der Synchronmotor

=====

2.21 Das Drehfeld

Wird den im Stator um je 120° versetzten Spulen eines Generators Drehstrom zugeführt, so entsteht zwar ein Magnetfeld von konstanter Größe, das aber keine feststehende N-S-Richtung hat. Dieses Magnetfeld bewegt sich kreisförmig drehend und wird deshalb als Drehfeld bezeichnet.

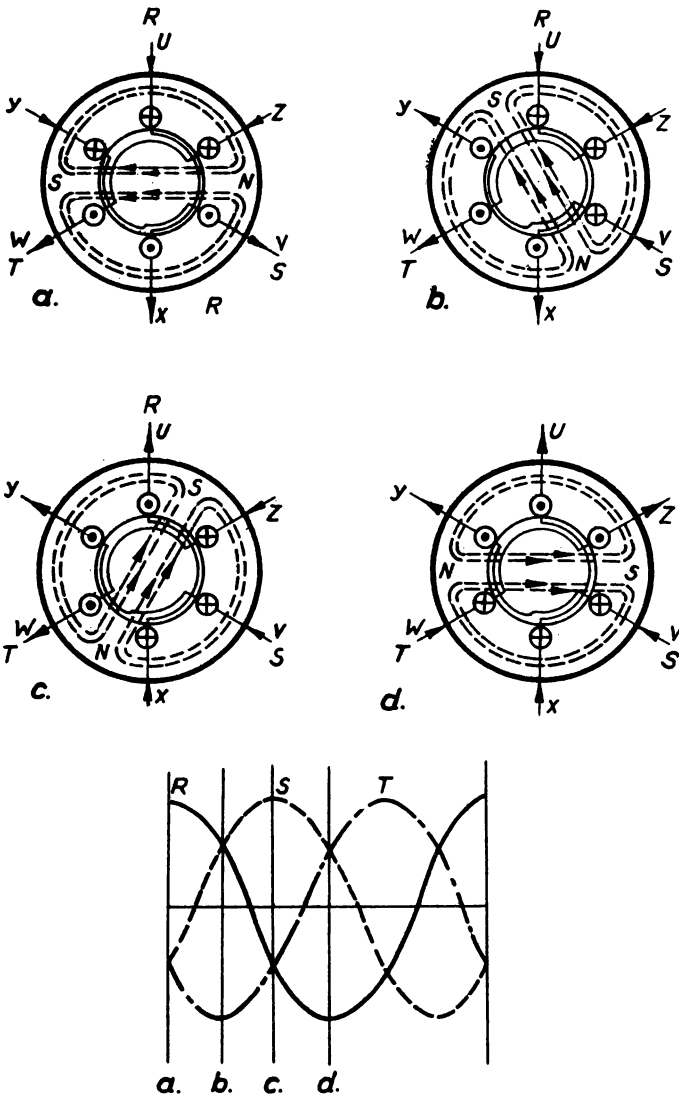


Bild 8: Entstehung des Drehfeldes

Im Augenblick a (Bild 8) hat der Strom im Strang R seinen Höchstwert, während die Ströme in den Strängen S und T negativ gerichtet sind und halbe Größe haben. Tragen Sie die Stromrichtungen in das Spulenbild ein, so erkennen Sie, daß die 3 Stränge ein gemeinsames Feld erzeugen, das in waagerechter Richtung von rechts nach links verläuft. Bei b hat der Strom im Strang T seinen negativen Höchstwert, während die Ströme in den Strängen R und S positiv gerichtet sind und wiederum halbe Stärke haben. Das von den Strängen erzeugte Feld verläuft jetzt von rechts unten nach links oben. Verfolgen Sie den weiteren Verlauf, so finden Sie, daß am Ende der Periode das Feld gerade eine Umdrehung gemacht hat. Ein solches Feld heißt Drehfeld. Die Drehzahl, mit der das Feld umläuft, ergibt sich zu

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

2.42 Der Aufbau und die Wirkungsweise des Synchronmotors

Der Synchronmotor ist weiter nichts anderes als ein Synchron-generator des Innenpoltyps. Die Statorwicklungen werden in Stern- oder Dreieckschaltung an das Drehstromnetz angeschlossen, während die Erregerwicklung (Rotor) an eine Gleichstromquelle gelegt wird.

Wird die Maschine erregt und die Ständerwicklung an das Netz angeschlossen, dann nimmt sie einen unzulässig hohen Strom auf, kommt aber nicht zum Laufen. Bringt man jedoch das erregte Polrad annähernd auf Synchrondrehzahl, dann läuft es bald synchron mit dem Drehfeld bei Nennstromaufnahme weiter. Wie ist das zu erklären?

Befindet sich das Polrad in der in Bild 9 gezeichneten Lage, und hat der Strom in der Ständerwicklung im Augenblick die in Bild 9 angegebene Richtung, so will sich das Polrad in Pfeilrichtung drehen. Im nächsten Augenblick hat sich der Strom in der Ständerwicklung umgekehrt. Das bedeutet, daß sich das Polrad entgegengesetzt drehen will. Diese Bewegungen finden aber infolge der großen Masse des Polrades nicht statt,

es bleibt einfach stehen. Ist es aber auf synchrone Drehzahl oder "in Tritt" gebracht worden, dann läuft es synchron weiter.

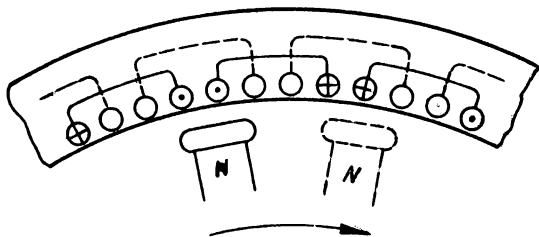


Bild 9
Teil des Polrades und der Ständerwicklung eines Synchronmotors

Erst nach erfolgter Synchronisation kann der Motor ans Netz gelegt und belastet

werden. Nur bei zu starker Überlastung fällt der Synchronmotor "außer Tritt" und bleibt unter Kurzschluß stehen.

2.23 Das Anlassen der Synchronmotoren

Der Synchronmotor kann ebenso wie der Synchrongenerator erst dann ans Netz angeschlossen werden, wenn die Synchronisierung erfolgt ist. Wird die Statorwicklung des Motors eingeschaltet, ohne die Phasengleichheit abzuwarten, dann entsteht ein Kurzschluß, weil ein positiver gegen einen negativen Strang arbeiten könnte.

Das Anwerfen kann durch einen besonderen Anwurfmotor geschehen oder auch mittels einer auf dem Polrad angebrachten Hilfswicklung, durch die der Synchronmotor wie der später behandelte Drehstrom-Kurzschlußläufermotor anläuft. Nach erfolgtem Synchronisieren wird diese Hilfswicklung wirkungslos.

2.24 Die Erregung des Synchronmotors

Bei normaler Erregung nimmt der Synchronmotor weder Blindstrom (Magnetisierungsstrom) aus dem Netz auf, noch gibt er welchen ab; d.h. sein Leistungsfaktor ist 1. Der Strom in den Zuleitungen und in der Statorwicklung ist am kleinsten. Bei Untererregung belastet der Synchronmotor das Netz induktiv,

bei Übererregung kapazitiv. In letzterem Fall gibt er also Blindleistung in das Netz ab und verbessert so den Leistungsfaktor.

Obwohl das Einschalten der Synchronmotoren mit einem Anlauf bis zum Synchronismus verbunden ist, hat sich der Synchronmotor im Dauerbetrieb für große Antriebe eingeführt, wobei es auf konstante Drehzahl ankommt. So werden z.B. schnellaufende Synchronmotoren zum Antrieb von Umformern und Kreiselverdichtern, langsamlaufende zum Antrieb von Kolbenverdichtern und Walzenstraßen benutzt. Zu seinen wertvollen Betriebseigenschaften gehört der gute Leistungsfaktor ($\cos \varphi = 1$ oder Blindleistungsabgabe ans Netz), hoher Wirkungsgrad und verhältnismäßig kleiner Einschaltstrom.

Weil Synchronmotoren mit zur Verbesserung des Leistungsfaktors dienen, bezeichnet man sie auch als Phasenschieber oder als Blindleistungsmaschinen.

Zusammenfassung =====

Der Synchronmotor ist die Umkehrung des Synchrongenerators. Der Synchronmotor kann ohne besondere Hilfsmittel nicht von selbst anlaufen. Er muß auf die Synchrondrehzahl gebracht, synchronisiert und dem Netz parallel geschaltet werden, bevor er belastet werden kann. Bei starker Überlast fällt er "außer Tritt".

Bei Übererregung des Synchronmotors entsteht eine kapazitive, bei Untererregung eine induktive Netzbelastung. Der Motorstrom ist in beiden Fällen größer als bei $\cos \varphi = 1$.

Ü b u n g e n

6. Wovon ist die Drehzahl des Synchronmotors abhängig?
7. Warum kann der Synchronmotor nicht von selbst anlaufen?
8. Stellen Sie Vor- und Nachteile des Synchronmotors einander gegenüber!

2.3 Transformatoren

=====

2.31 Die Wirkungsweise des Transformators

Auf einem geschlossenen Eisenkern seien entsprechend Bild 10 zwei Spulen 1 und 2 mit den Windungszahlen w_1 und w_2 angebracht. Die Spule 1 wurde an eine Wechselspannung U_1 gelegt. Diese treibt einen Strom I_1 durch die Spule 1, der im Eisen den Wechselfluß Φ hervorbringt. Durch diesen Wechselfluß Φ werden in den Windungen der Spule 2 nach dem Induktionsgesetz Wechselspannungen induziert. Die Summe der einzelnen Windungsspannungen ergibt die Spannung

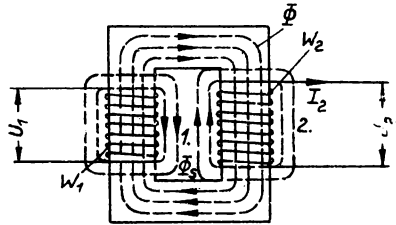


Bild 10
Prinzip des Transformators

U_2 . Je mehr Windungen die Spule 2 hat, desto größer ist also die Spannung U_2 . Der Transformator ist also - wie Sie erkennen - eine ruhende Maschine, die eine gegebene Wechselspannung in eine andere Wechselspannung bei gleichbleibender Frequenz umwandelt. Das Verhältnis $U_1 : U_2$ ist abhängig vom Verhältnis $w_1 : w_2$. Dieses Verhältnis heißt Übersetzungsverhältnis. Es gilt also:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u}} \quad (2)$$

in Worten:

Beim Transformator verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen.

Als Eingangs- oder Primärseite bezeichnet man beim Transformator die Seite, an der die elektrische Energie zugeführt wird. Die andere Seite ist die Ausgangs- oder Sekundärseite. Demnach kann sowohl die Oberspannungsseite Primär- oder Sekundärseite sein.

Weil beim Transformator keine mechanischen Verluste vorhanden sind, ist sein Wirkungsgrad sehr hoch. Bei den größten Transformatoren beträgt er bei Vollast 99,8%. Die geringen Ver-

luste setzen sich aus den Wicklungs- und Eisenverlusten zusammen. Die Wicklungsverluste entstehen durch den Ohmschen Widerstand der Wicklungen, die Eisenverluste durch Wirbelströme und durch den für die ständigen Unmagnetisierungen des Eisens benötigten Strom.

Sieht man von den geringen Verlusten ab, dann ist beim Transformator die Eingangsleistung gleich der Ausgangsleistung, also

$$N_1 = N_2$$

oder $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

oder $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$, und da $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$ ist,

gilt:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}$$

(3)

d.h. beim Transformator verhalten sich die Ströme umgekehrt wie die Spannungen oder Windungszahlen.

Lehrbeispiel 1

Ein Transformator hat ein Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = 1 : 12,5$. Die Primärleistung ist 10 kVA bei $\cos \varphi = 1$ und 220 V.

Wie groß ist:

- die Sekundärspannung?
- die Stromstärke in beiden Wicklungen, wenn die Verluste unberücksichtigt bleiben?

L ö s u n g :

a) $\frac{U_1}{U_2} = \ddot{u}$
 $U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} = \frac{220 \text{ V}}{1} = 220 \text{ V} \cdot 12,5 = 2750 \text{ V}$
=====

b) $I_1 = \frac{N_1}{U_1} = \frac{10000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 45,46 \text{ A}$
 $I_2 = \frac{N_2}{U_2} = \frac{10000 \text{ W}}{2750 \text{ V}} = 3,64 \text{ A}$
=====

2.32 Der Aufbau des Transformators

Mit Rücksicht auf die Wirbelströme ist der Eisenkörper der Transformatoren aus gegeneinander isolierten Blechen zusammengesetzt. Die Transformatorenbleche sind siliziumlegierte Eisenbleche. Der Siliziumzusatz setzt die magnetischen Eigenschaften nur gering herab, erhöht aber den elektrischen Widerstand des Eisens. Dadurch und durch die Blechung werden die Wirbelstromverluste klein gehalten.

Je nach dem Aufbau des Eisenkörpers unterscheidet man Mantel- und Kerntransformatoren. Beim Manteltransformator (Bild 11) umgibt das Eisen die Wicklung, beim Kerntransformator (Bild 12)

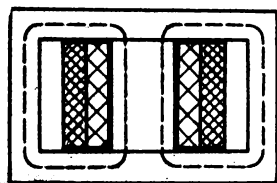


Bild 11
Manteltransformator

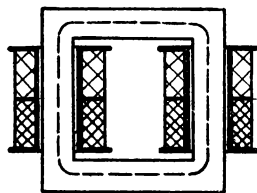


Bild 12
Kerntransformator

umschließen die Wicklungen das Eisen. Die von den Wicklungen umgebenen Eisenteile heißen Schenkel, Säulen oder Kerne. Sie sind durch die Joche miteinander verbunden. Beachten Sie, daß beim Manteltransformator der Querschnitt des Mittelschenkels doppelt so groß wie der Querschnitt der Außenschenkel und der Joche ist. Worauf ist das zurückzuführen? Betrachten Sie den in Bild 11 und Bild 12 angedeuteten magnetischen Fluß! Aus Gründen der Materialersparnis und der einfacheren Herstellung sind die Wicklungen kreisförmig ausgeführt. Damit der erforderliche Eisenquerschnitt das Spuleninnere weitgehendst ausfüllt, werden die Schenkelquerschnitte mit Ausnahme der kleineren Transformatoren, deren Kerne rechteckigen Querschnitt haben, ein- oder mehrfach abgesetzt (Bild 13 und 14).

Bei Transformatoren großer Leistung, bei denen beträchtliche Wärme entsteht, distanziert man noch die einzelnen Blechpakete, um Kühlkanäle zu erhalten (Bild 14).

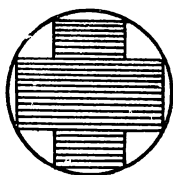


Bild 13
Schenkelquerschnitt für
kleinere Leistung

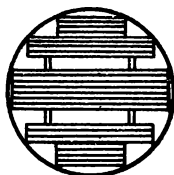


Bild 14
Schenkelquerschnitt für
größere Leistung

Die Wicklungen, deren Größe und Drahtquerschnitt von der Spannung und der Stromstärke abhängt, werden entweder als Zylinderwicklungen oder als Scheibenwicklungen ausgeführt. Bei der Zylinderwicklung umgibt die Oberspannungs- oder Hochspannungswicklung die Niederspannungswicklung (Bild 15). Die Niederspannungswicklung liegt wegen der besseren Isoliermöglichkeit gegen das Eisen innen. Die Hochspannungswicklung ist bei höheren Spannungen in mehrere Spulen unterteilt, die hintereinandergeschaltet sind. Dadurch ist eine bessere Isolierung möglich.

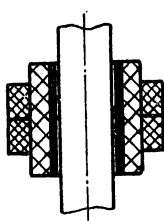


Bild 15
Zylinderwicklung

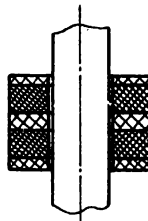


Bild 16
Scheibenwicklung

Bei der Scheibenwicklung (Bild 16) sind die Hoch- und Niederspannungswicklungen als Flachspulen ausgeführt. Die Endspulen bestehen aus 2 Halbspulen der Niederspannungswicklung. Bei dieser Wicklungsart muß jede Hochspannungsspule gegen die benachbarte Niederspannungsspule voll isoliert sein. Das bedingt bei hohen Spannungen viel Isoliermaterial und damit viel Isolierraum. Daher kommt die Scheibenwicklung nur dann in Frage, wenn sekundärseitig verschieden hohe Spannungen abgenommen werden sollen, weil sich bei ihr leicht entsprechen-

de Anzapfungen anbringen lassen.

Um die im Transformator durch die Kupfer- und Eisenverluste entstandene Wärme abzuführen, muß für entsprechende Kühlung gesorgt werden. Bei Transformatoren kleinerer Leistung wird Luftkühlung, bei solchen größerer Leistung Ölkühlung verwendet.

2.33 Der Einphasentransformator

Dieser Transformator wird als Kern- und als Manteltransformator ausgeführt.

Beim Kerntransformator sind beide Wicklungen je zur Hälfte auf beiden Kernen untergebracht, um eine starke Streuung der Kraftlinien zu vermeiden.

Der Manteltransformator zeichnet sich gegenüber dem Kerntransformator durch seine gedrungene Bauart aus. Er ist der am häufigsten verwendete Kleintransformator. Sie finden ihn z.B. im Rundfunkgerät und als Klingeltransformator.

2.34 Der Drehstromtransformator

Sie wissen, daß der Drehstrom aus 3 um 120° elektrisch versetzten Einphasenströmen besteht, deren Verkettung in Stern- oder Dreieckschaltung erfolgen kann.

Der Drehstromtransformator besteht ebenfalls aus 3 Einphasentransformatoren, die nicht nur elektrisch durch entsprechende Verbindungen der Wicklungen (Bild 17), sondern auch magnetisch verkettet sind (Bild 18). Die durch einen Strang erzeugten magnetischen Kraftlinien schließen sich über die Magnetkerne der beiden anderen Stränge.

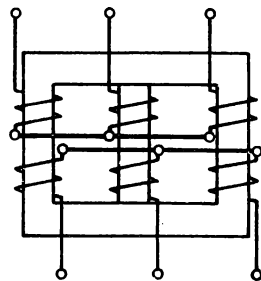


Bild 17
elektrische Verkettung

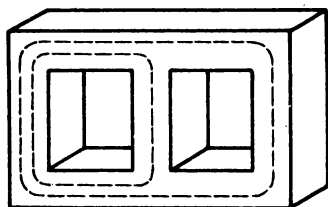


Bild 18
magnetische Verketzung

Die Wicklungen der Drehstromtransformatoren können verschieden geschaltet werden. Nach VDE 0532 gibt es 4 Schaltgruppen, die mit den großen Buchstaben A - D bezeichnet sind, und innerhalb jeder Schaltgruppe 3 Schaltungen, bezeichnet mit den Ziffern 1 - 3, wie Ihnen Tafel 1 zeigt. So bedeutet z.B. die Bezeichnung A_1 , daß Ober- und Unterspannungsseite im Dreieck geschaltet sind. Die Spannung wird hierbei, wie Sie aus dem Zeigerbild ersehen, mit unveränderter Phasenlage übertragen. Die Bezeichnung C_3 bedeutet Stern-Zickzack-Schaltung, wobei die Phasen um 150° verdreht übertragen werden.

Das Wesen der Zickzackschaltung besteht darin, daß die sekundäre Wicklung eines Kernes in 2 gleiche Teile geteilt ist und immer 2 Teile verschiedener Kerne gegeneinander geschaltet sind, wie Ihnen die entsprechenden Schaltbilder der Tafel 1 zeigen.

Sinnfälliger als die Bezeichnungen nach VDE sind die von der internationalen elektrotechnischen Kommission (IEC) angegebenen. Nach IEC bedeutet:

- D = Dreieckschaltung,
- Y = Sternschaltung,
- Z = Zickzackschaltung.

Große Buchstaben bezeichnen die Ober-, kleine die Unterspannungsseite. Die Zahl gibt den Phasenwinkel entsprechend dem Zifferblatt der Uhr an, wobei das überspannungsseitige Wicklungsende V immer auf die Ziffer 12 = 0 zeigt. Es bedeutet also: Dy 5: Überspannungsseitig Dreieckschaltung, unterspannungsseitig Sternschaltung, Phasen werden um $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ verdreht übertragen.

T a f e l 1

Schalt- gruppe	Schaltung		Vektorbild		Schaltbild		Sekundärer Nulleiter
	VDE	IEC	Oberspg.	Untersp.	Oberspg.	Untersp.	
A bzw. 0	A 1	Dd 0					nicht vorhanden
	A 2	Yy 0					wenig belastbar
	A 3	Dz 0					voll belastbar
B bzw. 6	B 1	Dd 6					nicht vorhanden
	B 2	Yy 6					wenig belastbar
	B 3	Dz 6					voll belastbar
C bzw. 5	C 1	Dy 5					voll belastbar
	C 2	Yd 5					nicht vorhanden
	C 3	Yz 5					voll belastbar
D bzw. 11	D 1	Dy 11					voll belastbar
	D 2	Yd 11					nicht vorhanden
	D 3	Yz 11					voll belastbar

Schaltungen und Schaltgruppen von Drehstrom-Transformatoren nach dem
Vorschriftenwerk deutscher Elektrotechniker

Die Stern- und Zickzackschaltung hat den Vorteil, daß sekundärseitig ein Nulleiter vorhanden ist, somit also 2 Sekundärspannungen zur Verfügung stehen. Bei ungleicher Strangbelastung darf der Nulleiter bei Sternschaltung mit nicht mehr als 10% des Nennstromes belastet werden, um stärkere Unsymmetrien zu vermeiden.

Bei der Zickzackschaltung verteilt sich die ungleiche Strangbelastung jeweils auf 2 Schenkel des Transformators, so daß hier ein Ausgleich stattfindet. Die Zickzackschaltung wird daher überall dort angewendet, wo sekundärseitig mit großer ungleicher Strangbelastung zu rechnen ist.

2.35 Das Betriebsverhalten des Transformators

Entnimmt man einem Transformator sekundärseitig keinen Strom, so arbeitet er im Leerlauf. Die zugeführte Spannung U_1 treibt einen um 90° nacheilenden Magnetisierungsstrom I_μ durch die Primärwicklung. In gleicher Phase liegt der von ihm erzeugte Fluß Φ . Unter der Voraussetzung, daß keinerlei Verluste und Widerstände vorhanden sind, sind die durch den Wechselfluß Φ in beiden Wicklungen induzierten Urspannungen E_1 und E_2 gleich groß, wenn die Windungszahlen beider Spulen dieselben sind. Die Spannungen E_1 und E_2 eilen dem Fluß um 90° nach.

Das entsprechende Zeigerdiagramm zeigt Bild 19. Weil die Spannung E_1 der angelegten Spannung U_1 entgegengesetzt gerichtet ist, kann E_1 auch nach oben abgetragen werden, jedoch dann mit entgegengesetztem Vorzeichen, also $-E_1$. Bekanntlich sind aber auch beim leerlaufenden Transformator Verluste vorhanden. Welcher Art sind sie?

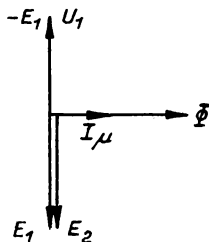


Bild 19
Verlustloser Transformator im Leerlauf

Die Stromwärmeverluste in der Primärwicklung sind - mit Ausnahme der Kleinsttransformatoren - beim Leerlauf so klein, daß man sie vernachlässigen kann. Für die

netisch miteinander verketteten Einphasentransformatoren.

Transformatoren werden bei kleinen Leistungen als Trocken-
transformatoren, bei großen als Öltransformatoren ausgeführt.

Die innere Schaltung der Transformatoren kann nach 4 Schalt-
gruppen mit je 3 verschiedenen Schaltungen erfolgen.

Das Transformator diagramm dient zur Beurteilung eines Trans-
formators.

Unter der Kurzschlußspannung versteht man die Spannung, die
bei kurzgeschlossener Sekundärseite primär angelegt werden
muß, damit in der Primärwicklung der Nennstrom fließt. Sie
wird in Prozent der Nennspannung angegeben.

Transformatoren können parallel geschaltet werden, wenn sie
gleiches Übersetzungsverhältnis, gleiche Kurzschlußspannun-
gen und gleiche Schaltgruppen haben.

Spartransformatoren haben nur eine Wicklung. Fehler auf der
Oberspannungsseite gefährden die Niederspannungsseite. Spar-
transformatoren werden zum Anlassen und Regeln von Wechsel-
und Drehstromkommutatormotoren verwendet.

Wandler sind Transformatoren, die die Stromstärken und Span-
nungen den Meßbereichen der Instrumente anpassen. Man unter-
scheidet Strom- und Spannungswandler.

Die Induktionsöfen, bei denen man Nieder- und Hochfrequenzöfen
unterscheidet, arbeiten nach dem Transformatorenprinzip. Auch
beim induktiven Härten, Schweißen, Löten wird dieses Prinzip
angewendet.

Ü b u n g e n

9. Was versteht man unter einem Transformator?
10. Warum können Transformatoren nicht für Gleichstrom be-
nutzt werden?
11. Was versteht man unter dem Übersetzungsverhältnis beim
Transformator?

12. Wodurch unterscheiden sich Kern- und Manteltransformatoren?
13. Worauf ist die Erwärmung eines Transformators zurückzuführen?
14. Was versteht man unter der Kurzschlußspannung eines Transformators?
15. Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, wenn Drehstromtransformatoren parallelgeschaltet werden sollen?
16. Welche Vorteile und Nachteile haben Spartransformatoren?
17. Ein Wechselstromtransformator hat primär 600 Windungen und wird an 220 V angeschlossen. Die Primärstromstärke beträgt 1,8 A. Die sekundäre Windungszahl ist 1200. Wie groß ist bei $\cos \varphi = 1$ und Vernachlässigung der Verluste
 1. die Primärleistung,
 2. der Sekundärstrom,
 3. die Sekundärspannung?
18. Für die Erweiterung einer Fabrikanlage ist ein Transformator aufzustellen. Angeschlossen werden 2 Motoren á 15 kW mit $\eta = 0,86$ und $\cos \varphi = 0,84$ und 1 Glühofen 8 kW. Für welche Scheinleistung ist der Transformator zu bestellen?

2.4 Asynchronmotoren

=====

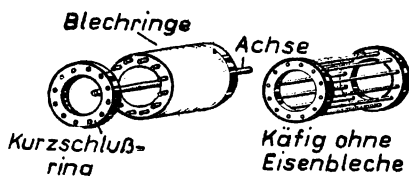
2.41 Der Kurzschlußläufer-Motor

Befindet sich an Stelle des Polrades eines Synchronmotors ein drehbar gelagerter Eisenzylinder, dann werden in ihm durch das Drehfeld Wirbelströme hervorgerufen. Diese erzeugen ihrerseits ein Feld. Der Zylinder wirkt dadurch wie ein Magnet, der sich naturgemäß in Richtung des Hauptfeldes - des Ständerfeldes - einzustellen versucht; d.h. der Zylinder versucht, synchron zu laufen. Die synchrone Drehzahl kann er aber niemals erreichen. Überlegen Sie, warum das nicht sein kann!

Die Wirbelströme verursachen im Eisen einen Stromwärmeverlust $I^2 \cdot R$. Um ihn klein zu halten, wird der Eisenkörper aus voneinander isolierten Blechen zusammengesetzt.

Damit aber ein starkes Läuferfeld entsteht, müssen die Läuferströme groß sein. Das erreicht man, indem man in Nuten des Eisenzylinders Kupfer- oder Aluminiumstäbe einlegt, die an beiden Seiten durch Ringe kurzgeschlossen werden. Eine Isolation der Leiter gegen das Eisen ist nicht erforderlich, weil sich die Ströme den Weg des geringsten Widerstandes suchen.

Betrachtet man die Stabwicklung für sich allein, so erkennt man, daß sie die Form eines Käfigs hat. Deshalb spricht man von einer Käfigwicklung und bezeichnet einen derartigen Läufer als Käfigläufer (Bild 31).



Wie bereits erwähnt, verbinden die Ringe an den Stirnseiten - die Kurzschlußringe - die einzelnen Stäbe miteinander. Man könnte also z.B. jeweils zwei Stäbe als eine

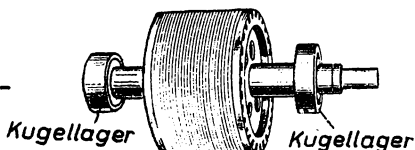


Bild 31: Käfigläufer und Käfig

kurzgeschlossene Windung betrachten. Aus diesem Grunde heißt der Läufer auch Kurzschlußläufer oder Kurzschlußanker, der Motor Kurzschlußläufermotor. Beim gewöhnlichen Käfigläufer sind die Leiterstäbe rund. Aus diesem Grunde nennt man den Läufer auch Rundstabläufer.

Vergegenwärtigen wir uns nochmals die Vorgänge, die sich im Läufer abspielen! Das Feld dreht sich mit synchroner Drehzahl, der Läufer steht zunächst still. Die Kraftlinien des Drehfeldes schneiden die Stäbe der Käfigwicklung. In diesen Stäben wird somit eine Spannung E_2 induziert. Weil die Stäbe kurzgeschlossen sind, fließt in ihnen ein starker Strom I_2 , dessen Wirkanteil mit dem Drehfeld ein Drehmoment nach der

Gleichung

$$M = \sigma \cdot \Phi \cdot I_2$$

bildet. Der Läuferstrom wird also hier von einer induzierten Urspannung angetrieben. Der Asynchronmotor wird deshalb auch häufig als "Induktionsmotor" oder, weil seiner Wirkungsweise das Drehfeld zugrunde liegt, als "Drehfeldmotor" bezeichnet.

2.42 Der Schlupf

Unter der Wirkung des Drehmomentes beginnt der Läufer, sich in Richtung des Drehfeldes zu drehen. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer wird somit immer kleiner. Wäre sie Null, d.h., würde die Läuferdrehzahl gleich der Drehfelddrehzahl sein, so würde im Läufer keine Urspannung induziert: der Motor könnte kein Drehmoment erzeugen. Weil dieser Betriebszustand nicht möglich ist, muß der Motor stets asynchron laufen. Die Läuferdrehzahl bleibt also hinter der Synchrondrehzahl zurück. Dieses Zurückbleiben heißt Schlupf oder Schlüpfung. Bedeutet n_1 die Synchrondrehzahl und n die wirkliche Drehzahl des Läufers, dann ist die Schlupfdrehzahl $n_1 - n$ und der Schlupf

$$\sigma = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

oder
$$\sigma \% = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100$$

Der Schlupf ändert sich mit der Belastung; bei Vollast ist er größer als im Leerlauf. Je nach Größe des Motors liegt er bei 2 ... 8%.

Lehrbeispiel 3

Die Drehzahl eines Asynchronmotors mit 8 Polen beträgt bei Belastung 720 min^{-1} . Wie groß ist der Schlupf?

L ö s u n g :

Aus Formel (1) folgt die Synchrondrehzahl

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{4} = 750 \text{ min}^{-1}$$

Damit ergibt sich der Schlupf zu

$$s \% = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 = \frac{750 - 720}{750} \cdot 100 = 4 \% \\ ===$$

2.43 Anlauf und Anlassen von Kurzschlußläufermotoren

Im Augenblick des Einschaltens steht der Läufer noch still. In ihm wird eine Spannung E_2 induziert, die mit E_{20} bezeichnet sei. Es gilt dann:

bei Stillstand $n = 0; \quad s = 100 \%;$ $E_2 = E_{20}$
bzw. Anlauf

bei synchronem Lauf $n = n_1; \quad s = 0;$ $E_2 = 0$

bei Nennbetrieb $n = n; \quad s = 2...8\%;$ $E_2 = s \cdot E_{20}$

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes ergibt sich der Läuferstrom zu

$$I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{R^2 + (s \cdot \omega \cdot L)^2}} \quad (4)$$

Hier ist R der Wirkwiderstand und $s\omega L$ der Blindwiderstand des Läufers.

Im Stillstand wirkt der Motor wie ein sekundär kurzgeschlossener Transformator, der an voller primärer Spannung liegt. Der Einschaltstromstoß ist daher sehr groß, er beträgt das 6-7fache des Nennstromes. Trotzdem ist das Anlaufdrehmoment klein, weil der Blindwiderstand in diesem Augenblick gegenüber dem Wirkwiderstand groß und somit der Wirkstromanteil klein ist. Mit dem Hochlaufen wird die Läuferspannung kleiner, damit auch der Blindwiderstand: der Wirkstromanteil wird größer, das Drehmoment steigt bis zu einem Höchstwert - dem Kippmoment -, um dann abzufallen (Bild 32).

Aus 2.42 und aus Bild 32 erkennen Sie, daß die Drehzahl des

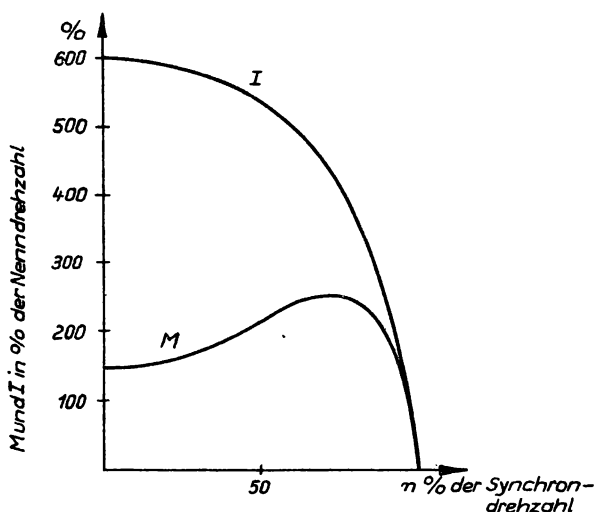


Bild 32
Strom- und Dreh-
momentenverlauf
eines Rundstab-
läufers

Asynchronmotors mit zunehmender Belastung nur wenig fällt, d.h., der Asynchronmotor zeigt Nebenschlußverhalten.

Infolge des hohen Einschaltstromstoßes lassen die EVU (Energieversorgungsunternehmen) in Niederspannungsnetzen nur Asynchronmotoren mit kleinen Leistungen (1 - 3 kW) für direkten Netzanschluß zu.

Um den hohen Einschaltstrom in ertragbaren Grenzen zu halten, wendet man in der Praxis u.a. folgende Möglichkeiten an:

1. Der Einschaltstromstoß kann verringert werden, wenn man die Ständerwicklung beim Anlauf an eine niedrigere Spannung als die normale legt, und nach dem Hochlaufen auf die volle Betriebsspannung geht. Bei größeren Motoren erfolgt die Herabsetzung der Ständerspannung für den Anlauf durch einen Anlaßtransformator. Dieser wird meist als Spartransformator mit mehreren Anzapfungen ausgeführt. Ein großer Nachteil ist die hierbei auftretende Verminderung des Anlaufmomentes, da das Drehmoment von der angelegten Ständerspannung quadratisch abhängig ist. Wenn allerdings ein sehr sanftes Anfahren erwünscht wird, ist diese Methode vorteilhaft.

Für kleinere Motoren kommt sehr häufig die Stern-Dreieck-Schaltung zur Anwendung. Das Grundprinzip dieser Schaltung beruht auf folgender Tatsache: Bei der Sternschaltung liegt an jedem Strang der Ständerwicklung eine um das $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -fache kleinere Leiterspannung (Bild 33); daher fließt auch nur das $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -fache des vollen Anlaufstromes. Da außerdem bei der Sternschaltung auch der Netzstrom nur gleich dem Strangstrom und nicht, wie bei der Dreieckschaltung (Bild 34), das $\sqrt{3}$ -fache ist, wird dem Netz nur $\frac{1}{(\sqrt{3})^2} = \frac{1}{3}$ des Anlaufstromes entnommen. Allerdings sinkt auch hier das Anlaufmoment auf ein Drittel des normalen. Deshalb sind

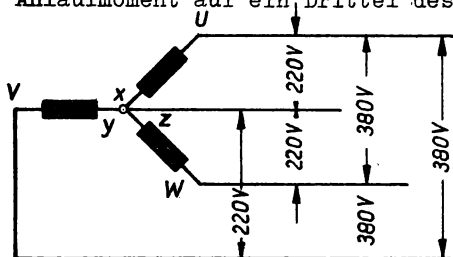


Bild 33: Sternschaltung

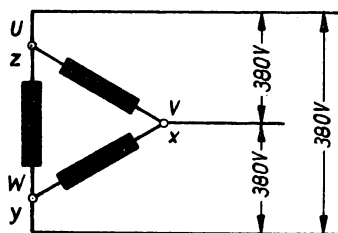


Bild 34: Dreieckschaltung

Asynchronmotoren mit Stern-Dreieck-Schaltung nur dort zu verwenden, wo im Leerlauf oder mit Teillast angefahren wird.

Das Ein- und Umschalten der Ständerwicklungen geschieht mit dem Stern-Dreieck-Schalter, der meist als Walzenschalter ausgeführt wird (Bild 35). Das Umschalten von Stern auf Dreieck darf erst dann erfolgen, wenn der Motor in Sternschaltung seine höchste Drehzahl erreicht hat. Wird bei geringerer Drehzahl die Umschaltung vorgenommen,

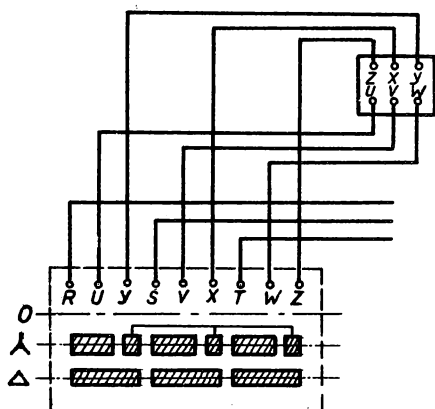


Bild 35: Δ -Schaltung

dann ergeben sich Überschaltströme, die dem Einschaltstrom sehr nahe kommen.

Um Asynchronmotoren mit Käfigläufer mit Stern-Dreieck-Schaltung anlassen zu können, müssen die Anfänge und Enden der Ständerwicklung an das Klemmbrett geführt sein. Es muß beachtet werden, daß die Spannung des Motors für Dreieckschaltung der Betriebsspannung, also der verketteten Netzspannung, entspricht, da ja die Dreieckschaltung die Betriebsschaltung ist. Dementsprechend könnten dem Motor bei Sternschaltung 660 Volt zugeführt werden, da bekanntlich die verkettete Spannung bei Sternschaltung um das $\sqrt{3}$ -fache höher als bei Dreieckschaltung ist. Soll ein Motor in einem Netz mit einer verketteten Spannung von 380 V mittels einem Stern-Dreieck-Schalter angelassen werden, so muß das Leistungsschild des Motors die Spannungsangaben 380/660 V tragen. Folglich kann ein Drehstrommotor mit der Spannungsangabe 220/380 V nicht in Verbindung mit einem Stern-Dreieck-Schalter für das vorgegebene Netz Verwendung finden.

3. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die sogen. Stromverdrängungsläufer. Hierbei ergibt sich gleichzeitig der Vorteil einer Erhöhung des Anlaufmomentes. Um bei Asynchronmotoren das Anlaufmoment zu erhöhen, muß, wie aus Gleichung (4) hervorgeht, der Ohmsche Widerstand im Läuferkreis gegenüber dem Blindwiderstand vergrößert werden. Weil hierdurch die Phasenverschiebung zwischen E_2 und I_2 verkleinert wird, wird der Wirkstromanteil größer. Das erreicht man durch besondere Läuferkonstruktionen, bei denen man die Erscheinungen der Stromverdrängung ausnutzt.

Der Läufer enthält statt der Rundstäbe schmale hohe Stäbe, die ebenfalls an den Stirnseiten durch Kurzschlußringe verbunden sind. Denkt man sich den Hochstab in übereinander geschichtete Stabteile zerlegt, so sind beim Anlauf die inneren Stabteile von wesentlich mehr Kraftlinien umschlungen als die oberen Teile, weil sich die Kraftlinien den kürzesten Weg im Eisen suchen (Bild 36).

Der induktive Widerstand der einzelnen Leiterelemente ist somit am Nutengrund am größten und nimmt nach außen zu ab. Infolgedessen wird der Strom nach außen abgedrängt, er ist also nicht mehr gleichmäßig in den Stäben verteilt. Beim Anlauf fließt er zur Hauptsache in den äußeren Leiterteilen, während die unteren nahezu stromlos sind. Weil sich der Strom auf einen kleineren Leiterquerschnitt beschränken muß, ist die Wirkung genauso, als wenn ein Widerstand in den Läuferstromkreis eingeschaltet wäre. Mit dem Steigen der Drehzahl sinkt die Frequenz des Läuferstromes und damit auch der induktive Widerstand in den Stäben, der nach Erreichen der vollen Drehzahl so klein geworden ist, daß er praktisch gegenüber dem Ohmschen Widerstand vernachlässigt werden kann.

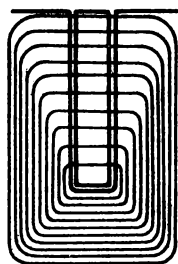


Bild 36: Verlauf der Streukraftlinien bei einem Hochstabläufer

Der Hochstabläufer - auch Wirbelstrom-, I, M Tiefnut- oder Stromdämpfungsläufer genannt - ergibt also gegenüber dem Rundstabläufer ein Anlaufmoment, das in der Nähe des Nenn Drehmomentes liegt, bei gleichzeitiger Erniedrigung des Anlaufstromes. Der Anlaufstrom beträgt jedoch immerhin noch das 3 - 5,5fache des Nennstromes (Bild 37).

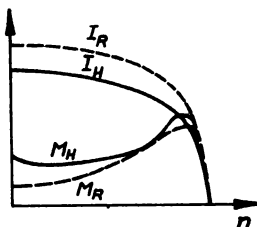


Bild 37: Strom- und Drehmomentenverhalten eines Motors mit Rund- und Hochstabläufer

Bei Motoren größerer Leistung wird der Doppelstab-, Doppelnut- oder Doppelkäfigläufer verwendet. Bild 38 zeigt mögliche Anordnungen der Stäbe von Doppelstabläufern. Die "Wicklungen" sind durch parallel geschaltete oder durch getrennte Kurzschlußbringe als oberer und unterer Käfig ausgeführt.

Die Wirkungsweise der Doppelstabläufer ist in jedem Falle grundsätzlich die gleiche. Der obere Käfig hat einen hohen Ohmschen Widerstand und eine geringe Streuung; bei dem unteren Käfig liegen die Verhältnisse umgekehrt. Beim Anlauf

fließt der Strom hauptsächlich im oberen Käfig. Weil R relativ groß ist, bleibt der Stromfluß begrenzt, der Rotor entwickelt aber trotzdem ein großes Anlaufmoment. Im Lauf verteilt sich der Strom

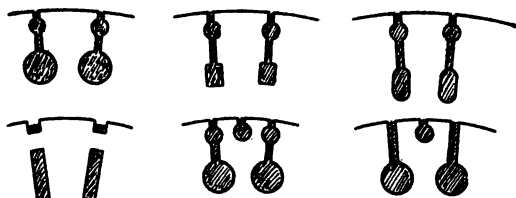


Bild 38: Anordnung der Stäbe von Doppelstabläufern

auf beide Käfige entsprechend den Ohmschen Widerständen. An der Drehmomentbildung nehmen beide Käfige teil. Der Drehmomentenverlauf der beiden Käfige läßt sich in weiten Grenzen durch Wahl verschiedener Ohmscher und induktiver Widerstände verändern. Durch wahlweise Zusammenstellung der Kennlinien für den oberen und unteren Käfig kann man daher beim Doppelstabläufer die verschiedenartigsten Anlaufverhältnisse erzielen.

Wie Sie aus dem Drehmomentenverlauf eines Doppelstabläufers (Bild 39) erkennen, sinkt das Anlaufmoment zunächst etwas ab und steigt dann wieder hoch. Die tiefste Stelle des Drehmomentenverlaufs bezeichnet man deshalb als Hochlaufmoment. Der Abfall des Anlaufmomentes auf das Hochlaufmoment beruht auf dem Übergang des Stromes von dem einen auf den anderen Käfig. Bei schräger

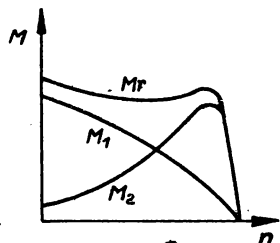


Bild 39: Drehmomentverlauf eines Doppelstabläufers

Anordnung der Nuten im Läufer kann man dieser Erscheinung entgegenwirken.

Rundstab-, Hochstab- und Doppelstabläufer werden heute vielfach mit gegossener Aluminiumwicklung hergestellt. Läuferstäbe, Käfige und Lüfterflügel bilden einen zusammenhängenden Gußkörper, der mit dem Eisen fest verbunden ist. Die gegossenen Wicklungen sind mechanisch äußerst widerstandsfähig und gegen Wärmeeinwirkungen unempfindlich. Die Wicklung wird im Preßguß- oder Schleudergußverfahren hergestellt, es fallen dadurch

jegliche Löt- oder Schweißstellen weg (Bild 40).

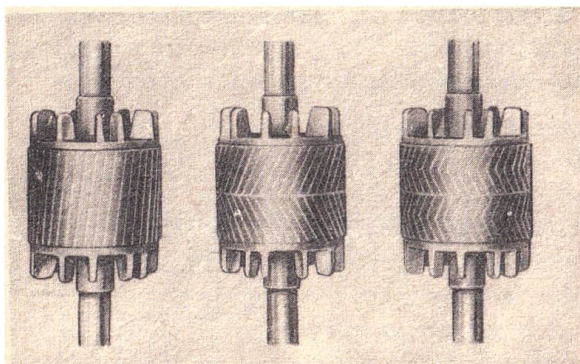


Bild 40: Aluminiumgegossene Käfigläufer

2.44 Der Schleifringläufer-Motor

Die Wicklung des Ständers ist dieselbe wie beim Kurzschlußläufermotor. Lediglich, wie der Name schon sagt, ist der Läufer anders ausgelegt. Anstelle der Läuferstäbe trägt der Läufer eine in Stern geschaltete Dreiphasenwicklung. Die drei Anfänge der Wicklungen, mit der Bezeichnung u-v-w, sind an drei Schleifringe geführt, die auf der Welle isoliert angebracht sind. Auf den Ringen schleifen je eine oder mehrere Kohlebürsten. Die Bürsten eines Schleifringes sind untereinander parallel geschaltet und stehen durch eine gemeinsame Leitung mit einer beliebigen Klemme des Anlagers in Verbindung. Entsprechend der Zahl der Schleifringe führen somit 3 Leitungen zu einem veränderlichen Widerstand, dem Anlasser (Bild 41).

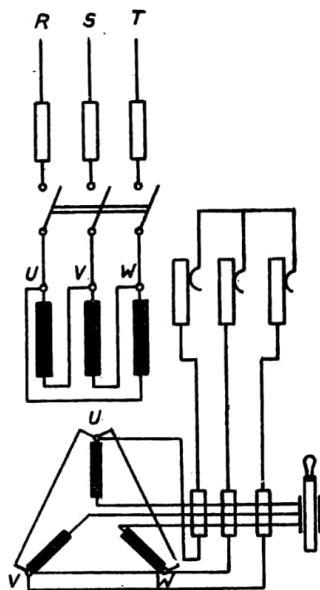


Bild 41: Drehstrommotor mit Schleifringläufer (Schaltbild)

In dem Maße, wie der Motor seine Drehzahl steigert, wird der Anlaßwiderstand allmählich abgeschaltet. Steht der Anlasser auf dem letzten Kontakt, so ist der gesamte Widerstand abgeschaltet; die Läuferwicklung ist durch den Sternpunkt des Anlagers kurzgeschlossen. Der Motor arbeitet also jetzt wie ein Drehstrom-Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer.

Zur Vermeidung der Bürstenreibung, der Abnutzung der Bürsten und Schleifringe und des Auftretens von Bürstenfeuer während des Betriebes werden bei größeren Motoren, etwa von 15 kW an, nach erfolgtem Anlauf erst die Schleifringe kurzgeschlossen und dann die Bürsten abgehoben. Dies geschieht durch eine direkt am Motor angebrachte Bürstenabhebevorrichtung (Bild 42).

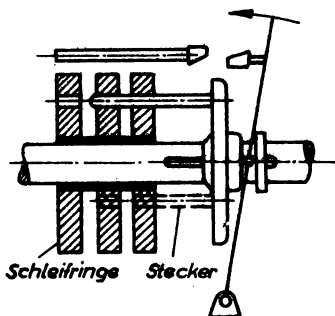


Bild 42: Bürstenabhebevorrichtung

Die Läuferwicklungen dieses Motors, gleichgültig ob es sich um einen Niederspannungs- oder Hochspannungsmotor handelt, sind so bemessen, daß die Rotorspannung 250 V nicht überschreitet, denn bei höheren Spannungen treten Isolationsschwierigkeiten auf. Weil sich Ständer- und Läuferspannung umgekehrt wie die im Ständer und Läufer auftretenden Ströme verhalten, ist der Strom im Läufer meist erheblich höher als die aufgenommene Motorstromstärke. Deshalb sind dann auch die Leitungen zum Anlasser entsprechend stärker ausgeführt als die Zuleitungen vom Netz.

Es könnte nun leicht die Frage auftreten, warum baut man überhaupt Schleifringläufer, wenn sie doch betriebsmäßig auch als Kurzschlußläufer arbeiten?

Denken Sie an den Zweck des Anlagers bei Gleichstrommotoren! Die gleiche Aufgabe hat auch hier der Anlasser. Er soll zur Vergrößerung des Ohmschen Widerstandes im Läuferkreis beitragen, um den Anlaufstrom zu vermindern. Gleichzeitig ergibt sich noch ein weiterer Vorteil. Durch Vergrößerung des Ohm-

sehen Widerstandsanteils ergibt sich zwangsläufig auch eine Vergrößerung des Wirkstromes, und damit eine Erhöhung des Anlaufmomentes. Wie Sie bereits wissen, ist ja für die Bildung des Drehmomentes die Größe des Wirkstromes maßgebend.

Schleifringläufer werden bei Antrieben mit Vollast- oder Schwerlastanlauf verwendet. Sie sind teurer als Kurzschlußläufermotoren.

2.45 Drehzahl- und Drehrichtungsänderung bei Asynchronmotoren

Aus der Gleichung

$$f = \frac{n_1 \cdot p}{60}$$

folgt

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p} \quad \text{I}$$

Aus der Gleichung

$$s\% = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100$$

ergibt sich

$$n = n_1 \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) \quad \text{II}$$

Aus den Gleichungen I und II erkennen Sie, daß die Drehzahl der Asynchronmotoren sich nur ändern läßt durch

1. Veränderung des Schlupfes,
2. Veränderung der Polzahl,
3. Veränderung der Frequenz.

1. Wird bei einem Schleifringläufer an Stelle des Anlaufwiderstandes, der ja nur für kurzzeitige Belastung bemessen ist, ein Regelwiderstand angebracht, der für Dauereinschaltung geeignet sein muß, so kann die Kurbel des Reglers auf jedem beliebigen Kontakt stehenbleiben und dadurch die Drehzahl ändern. Diese Art der Drehzahländerung entspricht dem Vorschalten eines Widerstandes vor den Anker eines Gleichstrommotors. Sie ist unwirtschaftlich, weil im Widerstand ein großer Teil der dem Netz entnommenen Leistung in Wärme umgesetzt wird. Außerdem nimmt neben der Drehzahl auch die

Leistung des Motors ab. Infolgedessen wird eine Drehzahlregelung mittels Regelwiderstandes selten angewendet.

2. Die Drehzahl eines Asynchronmotors läßt sich einfach dadurch ändern, daß der Motor mit 2 Wicklungen versehen wird, die für verschiedene Polzahlen ausgeführt sind. Derartige Motoren heißen polumschaltbare Motoren. Je nachdem, ob die eine oder die andere Wicklung eingeschaltet wird, erhält man 2 Drehzahlen.

Ist der Läufer mit Phasenwicklungen versehen, dann muß er ebenfalls so vielpolig gewickelt sein wie der Ständer. Wird die Ständerwicklung umgeschaltet, dann muß auch die Läuferwicklung umgeschaltet werden. Das ist jedoch mit großen Schwierigkeiten verknüpft. Beim Läufer mit Käfigwicklung spielt die Polzahl des Ständers keine Rolle, er ist für jede beliebige Polzahl benutzbar. Deshalb sind polumschaltbare Motoren immer mit Käfigläufern ausgerüstet.

Da die Polpaarzahl nur ganzzahlige Werte annehmen kann, erfolgt die Drehzahlregelung in relativ groben Stufen (Bild 43). Die polumschaltbaren Motoren sind wegen ihrer umfangreichen Ständerwicklung stets teurer und größer als Asynchronmotoren für eine Polpaarzahl. Dafür ist aber diese Methode zur Drehzahländerung wirtschaftlich, da keine zusätzlichen Verluste auftreten. Das Nebenschlußverhalten wird nicht beeinträchtigt. Es werden häufig Drehstrom-Asynchronmotoren mit 2 oder 3 verschiedenen Drehzahlstufen verwendet.

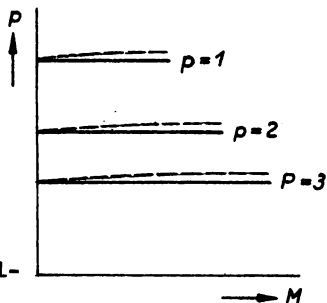


Bild 43: Drehzahlsteuerung durch Polumschaltung beim Kurzschlußläufer

3. Durch Änderung der Frequenz kann man Drehzahlen sowohl über als auch unterhalb der Normaldrehzahl eines Asynchronmotors erhalten. Zur Umformung eines Stromes von gegebener Frequenz in einen Strom von anderer Frequenz dienen Fre-

quenzwandler oder Periodenumformer.

Um bei Asynchronmotoren die Drehrichtung zu ändern, muß die Drehfeldrichtung geändert werden. Das geschieht einfach durch Umklemmen zweier Leitungen am Klemmbrett der Motoren oder auch an jeder anderen Stelle der Zuleitungen zwischen Netz und Ständer.

2.46 Der Leistungsfaktor bei Asynchronmotoren

Der einem Drehstrommotor zugeführte Strom I besteht aus einem Wirkstrom und einem Blindstrom. Der Blind- oder Magnetisierungsstrom dient zur Erzeugung des Feldes.

Die Größe des aufgenommenen Blindstromes kann bei Asynchronmotoren durch richtige Auswahl und Ausnutzung der Motoren beeinflusst werden. Bei Teillasten und im Leerlauf nehmen die Asynchronmotoren fast denselben Blindstrom auf wie bei Volllast. Infolgedessen ist das Verhältnis des Wirkstromes zum Gesamtstrom, also $\cos \varphi = \frac{I_w}{I}$, bei Volllast günstiger als bei Leerlauf oder Teillast. Hieraus folgt, daß die Motoren nicht zu reichlich bemessen sein dürfen. Sind in einem Betrieb mehrere Maschinen mit stark wechselnder Belastung vorhanden, so wird der zu großen Aufnahme von Blindstrom durch Einrichtungen zum Ausgleichen oder zum Kompensieren des Blindstromes entgegengewirkt. Hierzu können Synchronmotoren oder Kondensatoren dienen.

Schnellaufende Motoren haben einen besseren Leistungsfaktor als langsam laufende, die wegen ihrer größeren Polzahl eine größere Wicklung besitzen und daher auch mehr Blindstrom aufnehmen. Ein großer Luftspalt zwischen Läufer und Ständer setzt ebenfalls den Leistungsfaktor herab. Die Luftspaltweite wird daher so gering wie möglich gemacht, bei kleinen Motoren beträgt sie 0,2 mm.

2.47 Bremsung der Drehstrommotoren

Um nach dem Abschalten den Drehstrommotor schnell zum Still-

stand zu bringen, kommen 2 Verfahren zur Anwendung:

1. die Gegenstrombremsung,
2. die Gleichstrombremsung.

Bei der Gegenstrombremsung werden einfach 2 Phasen der Zuleitung zum Motor vertauscht, d.h. die Drehrichtung umgekehrt. Dieses Verfahren kann für größere Motorleistungen nicht angewendet werden, weil dann die auftretenden Stromstöße zu groß werden. Ein weiterer Nachteil dieser Methode besteht in der Gefahr des Hochlaufens des Motors im entgegengesetzten Drehsinn.

Sehr verbreitet ist die Gleichstrombremsung. Bei ihr wird nach dem Abschalten die Ständerwicklung an eine Gleichspannungsquelle gelegt, z.B. an einen Trockengleichrichter, der an das Drehstromnetz angeschlossen ist. Der Läufer wirkt dann als Wirbelstrombremse.

Zusammenfassung

=====

Der Drehstrommotor mit Käfigläufer besteht aus dem Ständer mit den Phasenwicklungen und dem Läufer mit der Käfigwicklung. In der Käfigwicklung des Läufers entstehen durch das Drehfeld starke Ströme, durch die der Läufer in Drehrichtung des Drehfeldes mitgezogen wird.

Das Zurückbleiben der Drehzahl des Läufers eines Asynchronmotors hinter der Synchrondrehzahl wird Schlüpfung oder Schlupf genannt. Der Schlupf wächst, wenn auch wenig, mit der Belastung.

Beim Einschalten der Käfigläufermotoren entsteht ein sehr hoher Anlaufstromstoß. Trotzdem ist das Anlaufmoment klein, weil in diesem Augenblick der Blindwiderstand groß und der Wirkstromanteil klein ist.

Anlaßvorrichtungen bewirken, daß die Statorwicklungen beim Anlauf stufenweise auf die volle Netzspannung geschaltet werden. Zur Anwendung kommen Stern-Dreieck-Schalter, seltener

schlußmotors ist, entgegen.

Zusammenfassung

Universal- oder Allstrommotoren sind Einphasen-Reihenschlußmotoren kleinerer Leistung (bis 500 W), deren Magnetgestell aus Blechen zusammengesetzt ist.

Die Drehzahl der Allstrommotoren ist normalerweise bei Gleichstromanschluß um das $\frac{1}{\cos \varphi}$ -fache höher als bei Wechselstromanschluß.

Beim Drehstrom-Reihenschlußmotor ist jedes Ende der Phasenwicklung des Ständers mit einem der 3 um 120° versetzten Bürsten des Stromwenders entweder direkt oder über einen Zwischentransformator verbunden. Dadurch erzeugt der Läufer ein Drehfeld. Durch Zusammenwirken von Läufer- und Ständerdrehfeld entsteht in den Betriebsstellungen ein Drehmoment. Anlassen und Drehzahländerung geschieht durch Bürstenverschiebung entgegengesetzt der Drehrichtung.

Bei Drehrichtungsänderung müssen nicht nur die Bürsten über die Nullstellung hinaus entgegengesetzt verschoben, sondern auch 2 Zuleitungen vertauscht werden.

Man unterscheidet läufer- und ständergespeiste Drehstrom-Nebenschlußmotoren.

- Der läufergespeiste Drehstrom-Nebenschlußmotor besitzt einen Läufer mit Schleifringen und Stromwender. Die Statorwicklung ist an 2 gegeneinander verschiebbare Drehstrom-Bürstensätze angeschlossen. Die Drehzahl kann geändert werden durch Bürstenverschiebung, Drehrichtungsänderung durch Vertauschen zweier Netzanschlüsse und durch Verschieben der Bürsten im entgegengesetzten Sinne.

Beim ständergespeisten Drehstrom-Nebenschlußmotor unterscheidet man solche mit Regeltransformator und mit angezapftem Ständer. Die Drehzahländerung wird durch Verändern der Regelspannung herbeigeführt. Drehrichtungsänderung geschieht durch

Vertauschen zweier Zuleitungen am Ständer und am Regeltransformator.

Ü b u n g e n

30. Wie verhält sich ein normaler Universalmotor hinsichtlich der Drehzahl bei Anschluß an Wechselstrom und bei Anschluß an Gleichstrom?
31. Welche Eigenschaften hat ein Reihenschlußmotor?
32. Bei einem läufergespeisten Drehstrom-Nebenschlußmotor stehen die Bürsten genau einander gegenüber. Wie verhält sich die Drehzahl?
33. Wie wird die Drehrichtung bei diesem Motor geändert?
34. Welche Vorteile haben Stromwendermotoren gegenüber den normalen Wechsel- und Drehstrommotoren?

3. Elektronische Drehzahlstellung

=====

Aus 2.4 und 2.5 haben Sie erkannt, daß eine Drehzahländerung bei den Drehstrommotoren mit einfachen Mitteln nicht herbeigeführt werden kann. Gleichstrommotoren dagegen lassen durch Regelwiderstände eine stetige Drehzahländerung zu. Arbeitsmaschinen, die in der Drehzahl stetig regelbar sein müssen, erhalten deshalb als Antriebsmotor einen Gleichstrommotor. Die für seinen Betrieb benötigte Gleichspannung wird durch Gleichrichtung der im Netz vorhandenen Wechselspannung erhalten.

Ein Teilgebiet der Elektrotechnik ist die Elektronik. Man versteht darunter elektrische Stromkreise und Schaltungen, bei denen die Fortbewegung elektrischer Ladungen an wenigstens einer Stelle durch einen evakuierten oder gasgefüllten Raum stattfindet. Zur Gleichrichtung von Wechselspannung

benutzt man neben anderen die Quecksilberdampf- und Glühkathodengleichrichter. Mit ihnen ist - wie Sie kennenlernen werden - auf einfachste Art eine stetige Drehzahländerung der Motoren möglich. Weil bei diesen Gleichrichtern der Strom durch evakuierte bzw. gasgefüllte Gefäße fließt - also elektronische Geräte angewendet werden -, spricht man von elektronischer Drehzahlstellung.

3.1 Quecksilberdampfgleichrichter

3.11 Wirkungsweise

In dem im Bild 51 dargestellten hoch-evakuierten Glasgefäß sind zwei Elektroden A und K vorhanden. Die Elektrode A besteht aus Graphit oder Metall, die Elektrode K aus Quecksilber. Es ist Ihnen bekannt, daß auf Weißglut erhitzte Metalle Elektronen aussenden oder emittieren. Wenn man also die Elektrode K, das Quecksilber, auf eine entsprechend hohe Temperatur bringt, werden Elektronen emittiert.

Elektronen haben negative Ladung.

Legt man daher an die Elektrode A eine genügend hohe positive Spannung,

dann werden die Elektronen von der Elektrode K, der Kathode, zur Elektrode A, der Anode, beschleunigt. Der Strommesser zeigt also jetzt einen Stromfluß an.

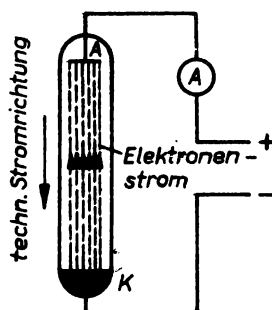


Bild 51
Quecksilberdampfentladungsgefäß

Betrachten wir die Vorgänge, die sich im Entladungsgefäß abspielen, etwas näher. Durch das Erhitzen der Kathode ist ein Teil des Quecksilbers verdampft, d.h., das Gefäß ist mit mehr oder weniger Quecksilberdampf gefüllt. Auf ihrem Weg zur Anode stoßen die Elektronen mit neutralen Gasmolekülen des Quecksilbers zusammen. Ist die Geschwindigkeit eines Elektrons genügend groß, dann reißt es bei diesem Zusammenprall ein

Elektron aus dem Gasmolekül. Mit diesem zusammen fliegt es weiter zur Anode. Auf ihrem Weg stoßen sie mit weiteren Gasmolekülen zusammen, wobei sich derselbe Vorgang wiederholt. Die eines Elektrons beraubten Gasteilchen sind nicht mehr neutral. Was für eine Ladung haben sie? Diese als Ionen bezeichneten Teilchen wandern zur Kathode.

Sie erkennen, daß somit im Entladungsgefäß zwei Strömungen vorhanden sind, nämlich der Elektronenstrom, der von der Kathode zur Anode verläuft, und der Ionenstrom, der umgekehrt zur Kathode fließt. Dieser Ionenstrom, der sich durch die Höhe des Gasdruckes leicht regeln läßt, ist gegenüber dem Elektronenstrom sehr klein. Dennoch ist er für den Entladungsvorgang von entscheidender Bedeutung. Wären keine Ionen vorhanden, dann könnte bei niedriger Anodenspannung die Anode nur einen sehr kleinen Teil der von der Kathode emittierten Elektronen anziehen. Die Hauptmasse der emittierten Elektronen befindet sich in unmittelbarer Nähe der Kathode und bildet die negative Raumladung. Sie erschwert die weitere Emission, weil sich gleichnamige Ladungen abstoßen, und setzt damit den Stromfluß durch das Entladungsgefäß herab. Die Wirkung der Raumladung wird durch die positiven Ladungsträger, deren Geschwindigkeit viel geringer als die der Elektronen ist, kompensiert. Würde die Anode mit dem negativen Pol verbunden werden, so käme trotz Erhitzung der Kathode kein Stromfluß zustande. Warum nicht? Der Entladungsvorgang findet also nur in einer Richtung statt und kann somit zur Gleichrichtung von Wechselspannungen dienen.

Bei den nach diesem Prinzip gebauten Quecksilberdampfgleichrichtern findet der Entladungsvorgang in Glas- oder Eisengefäßen statt.

Die Sekundärwicklung eines Transformators, der die Netzspannung auf die erforderliche Betriebsspannung des Quecksilberdampfgleichrichters transformiert, liegt entsprechend Bild 52 mit dem Gleichrichter und dem Verbraucher in Reihe. Bei genügend hoher Erhitzung der Kathode entsteht der erforderliche Quecksilberlichtbogen zwischen der Kathode und der Anode, der

von dem Anodenwechselstrom nur die Halbwellen durch den Gleichrichter läßt, bei denen die Anode der positive Pol ist. Der durch den Verbraucher fließende Gleichstrom besteht somit aus einzelnen in derselben Richtung laufenden Stromstößen.

Beachten Sie, daß der Elektronenstrom von der Kathode zur Anode verläuft. Die technische Stromrichtung ist umgekehrt. Es ist also die Kathode der positive Pol.

Um auch die andere Halbwelle des Wechselstromes gleichzurichten, erhält der Gleichrichter eine zweite Anode (Bild 53) und der Transformator eine Mittelanzapfung, die der Minuspol ist.

Der Elektronenstrom geht von der Kathode jeweils zu der positiven Anode, durch den Verbraucher und zur Kathode zurück. Zur Glättung des stark pulsierenden Gleichstroms bei diesem Einphasen-Quecksilberdampfgleichrichter wird hinter die Kathode eine Drosselspule geschaltet. Durch ihre Selbstinduktion verzögert sie das Ansteigen und Abfallen des pulsierenden Gleichstromes, wodurch ein teilweises Überdecken der Halbwellen erreicht wird. (Bild 54).

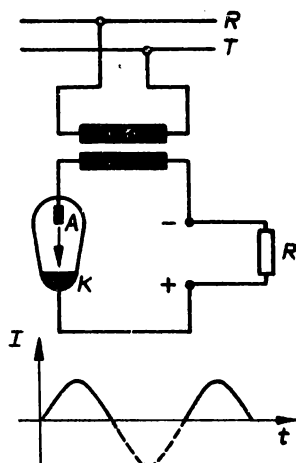


Bild 52: Einphasen-Quecksilberdampfgleichrichter mit einer Anode

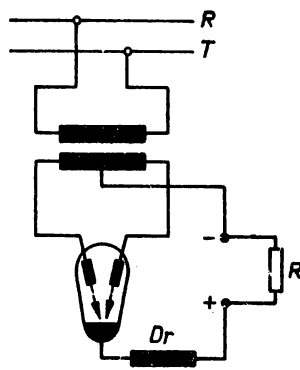


Bild 53: Einphasen-Quecksilberdampfgleichrichter mit 2 Anoden

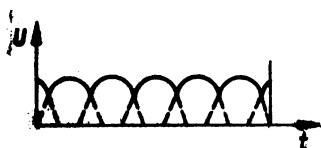


Bild 54
Spannungsverlauf beim Gleichrichter
des Bildes 53

Zur Gleichrichtung einer Dreiphasen-
spannung erhält der Gleichrichter drei
Anoden (Bild 55). Die Welligkeit des
durch diesen Gleichrichter erhaltenen
Gleichstroms ist bedeutend kleiner als
die des durch den Einphasengleichrich-
ter hervorgebrachten. Noch bessere
Gleichrichterwirkungen ergeben die
Sechs- bzw. Zwölfphasengleichrichter.

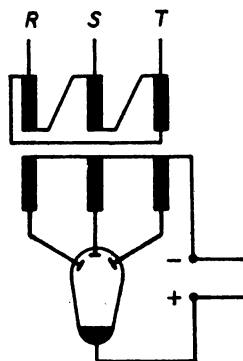


Bild 55: Drehstrom-
Quecksilberdampf-
gleichrichter

3.12 Die Zündung

Damit der Gleichrichter arbeiten kann, muß die Kathode auf
die entsprechende Betriebstemperatur gebracht werden. Das
geschieht durch die Zündung.

Bei der Tauchzündung wird der sich
in der Zündanode befindliche Zündstift
beim Einschalten des Gleichrichters
auf elektromagnetischem Wege in das
Quecksilber der Kathode getaucht
(Bild 56). Sobald der Zündstift das
Quecksilber berührt, wird die Erreger-
wicklung des Magneten stromlos. Der
Zündstift schnell zurück. Durch den

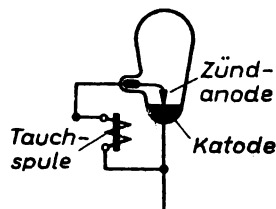


Bild 56: Tauchzündung

Öffnungsfunken entsteht ein Lichtbogen - der Zündlichtbogen-,
der die Kathode erhitzt. Hierdurch entsteht der zur Bildung
des Hauptlichtbogens nötige Quecksilberdampf. Der nun flie-
ßende Anodenstrom erzeugt auf der Oberfläche des Quecksilbers
den sogenannten Kathodenfleck. Das ist eine mehr oder weniger

große weißglühende Fläche, die bei großen Stromstärken in mehrere Teile zerfällt und hin und her wandert. Dieser Kathodenfleck, der eine Temperatur von etwa 3000°C hat, emittiert Elektronen und erzeugt gleichzeitig den für den Betrieb erforderlichen Quecksilberdampf, so daß der Zündstromkreis unterbrochen werden kann. Der Quecksilberdampf verdichtet sich im oberen Teil des Gefäßes an den kühlen Gefäßwänden wieder zu Quecksilber, das zur Kathode zurückfließt und diese so selbsttätig erneuert.

3.13 Die Hilfsanoden

Der Hauptlichtbogen erfordert zu seiner Aufrechterhaltung eine Mindeststromstärke von 5 A. Damit er bei Entnahme von Strömen unter 5 A nicht abreißt, müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden. Das Abreißen des Lichtbogens kann am besten durch Hilfsanoden verhindert werden. Durch die Hilfsanode (Bild 57) entsteht nach der ersten Zündung zwischen der Kathode und den Hilfsanoden ein Hilfslichtbogen, der dauernd, auch bei Unterbrechung des Gleichstromkreises, bestehen bleibt. Er erregt augenblicklich den Hauptlichtbogen, wenn der Gleichstromkreis wieder geschlossen wird, auch dann, wenn die Belastung weniger als 5 A beträgt.

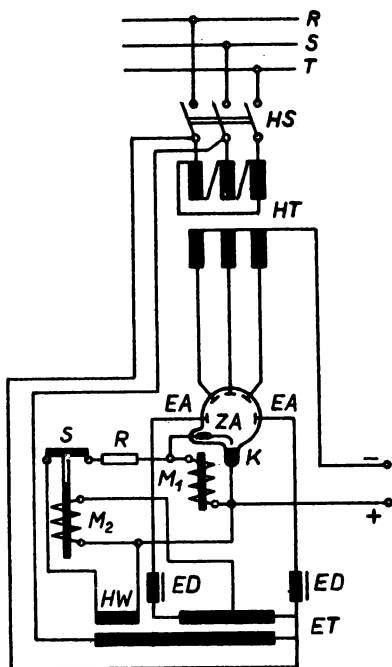


Bild 57: Schaltbild eines Quecksilberdampfgleichrichters mit Tauchzündung.

Bild 57 zeigt Ihnen das Schaltbild eines Drehstrom-Quecksilberdampfgleichrichters mit Tauchzündung. Beim Schließen des Hauptschalters HS erhält der Haupttransformator HT und der Erregertransformator ET Spannung. Von der sekundären Hilfswicklung HW des Erregertransformators fließt ein Strom über den Schalter S, den Widerstand R und die Magnetwicklung M_1 zur Hilfswicklung zurück. Dieser Strom erregt den Magneten M_1 . Dadurch wird der Zündstift der Zündanode ZA ins Quecksilber der Kathode getaucht und damit die Erregerwicklung M_1 stromlos. Das hat zur Folge, daß der Zündstift zurückschnellt und durch den Unterbrechungslichtbogen die Zündung der Hilfsanoden einleitet. Von der in der Mitte angezapften Sekundärwicklung des Erregertransformators fließt jetzt ein Strom über die Erregerwicklung M_2 , Kathode K, Hilfsanode EA und die Erregerdrossel ED zum Erregertransformator zurück. Durch die Wirkung der Erregerdrossel wird das Verlöschen des Hilfslichtbogens vermieden. Durch diesen Strom wird der Anker des Magneten M_2 angezogen und damit der Schalter S, also der Zündstromkreis, für die Betriebsdauer geöffnet. Zur Abführung der im Gleichrichtergefäß entstehenden Wärme dient ein unter ihm angebrachter Ventilator.

3.14 Die Rückzündung

Bei ungenügender Kühlung des Gleichrichters oder bei länger dauernder starker Überlastung wird die Temperatur im Innern des Gefäßes so hoch, daß die Anoden glühend werden und selbst Elektronen aussenden. Diese Erscheinung heißt "Rückzündung". Sie kommt einem Kurzschluß gleich und kann zur Zerstörung des Gleichrichters führen. Durch ein- oder mehrmaliges Abbiegen der Anodenarme bei den Gleichrichtern (Bild 58) wird vermieden, daß sich Quecksilbertropfen auf der Anode absetzen. Infolge der guten Kühlung kommen Rückzündungen bei den Gleichrichtern kaum noch vor.

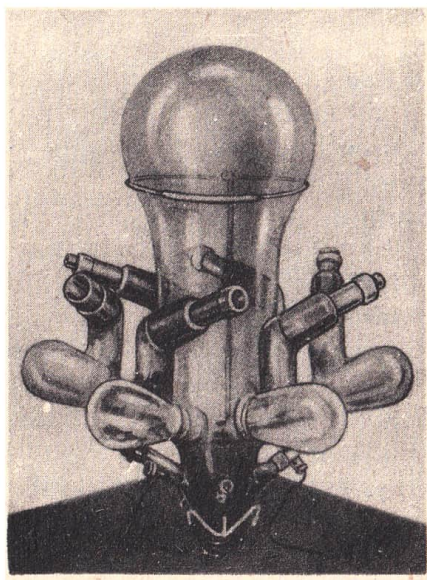


Bild 58
Quecksilberdampf-
gleichrichtergefäß

3.15 Die Spannungsreglung

Die Gleichspannung kann durch Veränderung der den Anoden zugeführten Wechselspannung, durch gleichstromseitig eingeschaltete Widerstände oder durch die Gittersteuerung geregelt werden. Zur Änderung der Anodenspannung dienen Gleichrichtertransformatoren, die primär- oder sekundärseitig anzapfbar sind. Eine stufenlose Spannungsreglung ist nicht möglich. Gleichstromseitig eingeschaltete Widerstände kommen nur bei kleinen Quecksilberdampfgleichrichtern in Betracht.

Der gittergesteuerte Quecksilberdampfgleichrichter gestattet die stufenlose Regelung der Gleichspannung auf einfachste Art und praktisch verlustlos. Das sogenannte Gitter - ein Drahtgitter oder ein gelochtes Blech - ist zwischen Anode und Kathode isoliert angebracht und mit einem äußeren Anschluß versehen (Bild 59).

Überlegen Sie sich, wie eine positive Ladung und wie eine negative Ladung des Gitters auf die von der Kathode emittier-

ten Elektronen wirken muß, wenn die Anode spannungslos ist!

Liegt an der Anode eine positive und am Gitter eine entsprechend hohe negative Spannung, dann werden alle von der Kathode emittierten Elektronen zurückgedrängt. Die positive Spannung der Anode kann also in diesem Falle auf die emittierten Elektronen nicht einwirken, die Anode kann durch das

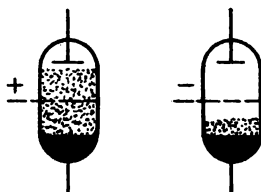


Bild 59: Elektronenbewegung bei positivem und negativem Gitter

Gitter nicht "durchgreifen". Je mehr aber die negative Gitterspannung verringert wird, um so mehr nimmt die Anodenspannung Einfluß auf die Elektronen. Bei einer bestimmten Gitterspannung - der kritischen Spannung - gelangen einige Elektronen durch das Gitter und fliegen zur Anode. Durch die abstoßende Wirkung des Gitters werden sie noch besonders beschleunigt. Sie ionisieren die Gasatome. Damit zündet der Gleichrichter. Ist der Anodenstrom einmal zum Fließen gekommen, dann kann er, auch durch eine hohe negative Gitterspannung, nicht geändert oder gar gesperrt werden, weil die positiven Ionen die Ladung des Gitters neutralisieren. Der Anodenstrom wird erst dann Null, wenn die betreffende Stromhalbwelle an der Anode durch Null geht.

Die Konstruktion des Gitters, die Anodenspannung und die Dampfdichte im Gefäß bestimmen die Gitterspannung, bei der die Zündung einsetzt. Zu jedem Augenblickswert der Anodenwechselspannung gehört eine ganz bestimmte kritische Spannung, die in Bild 60 durch die Zündkennlinie angegeben ist. Liegt die Gitterspannung unterhalb dieser Kennlinie, erfolgt keine Zündung. Sobald aber die Gitterspannung die Kennlinie schneidet, zündet der Gleichrichter (Bild 61). Der Anodenstrom fließt dann während der restlichen Halbperiode. Die mittlere Gleichspannung ergibt sich, wenn der Inhalt der schraffierten Fläche durch die Länge der Halbperiode geteilt wird. Wie Sie erkennen, ist die mittlere Gleichspannung um so kleiner, je mehr der Zeitpunkt der Zündung verzögert wird.

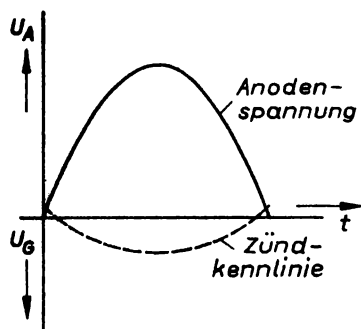


Bild 60: Zündkennlinie

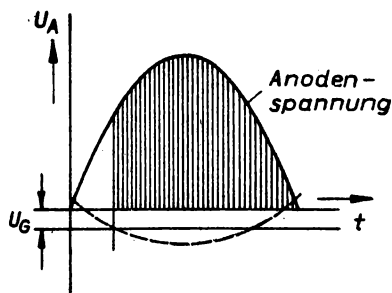


Bild 61: Gittersteuerung mit Gleichspannung

Die stufenlose Verschiebung des Zündzeitpunktes nennt man die Steuerung des Gitters. Sie bedarf nur einer geringen elektrischen Energie, die im Verhältnis zur gesteuerten Leistung praktisch bedeutungslos ist.

Geschieht die Gittersteuerung mit Gleichstrom, so kann die Regelung der vom Gleichrichter gelieferten Gleichspannung nicht bis auf den Wert Null erfolgen, wie Sie aus Bild 61 erkennen können. Die Gittersteuerung mit Gleichstrom gestattet nur die Verschiebung des Zündzeitpunktes bis zum Scheitelwert der Anodenwechselspannung.

Der Zündzeitpunkt wird über den Scheitelwert der Anodenwechselspannung hinaus durch Anlegen einer Wechselspannung an das Gitter verschoben. Dem Gitter ist zunächst eine so hohe negative Gleichspannung zugeführt, daß die Zündung nicht erfolgen kann (Bild 62). Dieser Gleichspannung wird eine Wechselspannung überlagert. Sobald deren positive Halbwelle die Zündlinie schneidet, erfolgt die Zündung. Hierbei müssen Anoden- und Gitterwechselspannung die gleiche Frequenz haben, und die Gitterwechselspannung muß in der Phasenlage gegenüber der Anodenwechselspannung verschiebbar sein. Das erreicht man mittels eines Drehreglers. Die Wirkung durch Veränderung des

Steuerwinkels zeigt deutlich Bild 62.

Weil die kritische Spannung vom Dampfdruck im Gefäß bestimmt wird, und dieser wiederum von der Belastung des Gleichrichters abhängt, sind Ungenauigkeiten im Zündeneinsatz vorhanden. Der gittergesteuerte Gleichrichter mit Stoßsteuerung vermeidet diesen Nachteil. Das Wesen dieser Steuerung besteht darin, daß am Gitter eine so hohe negative Spannung liegt, die mit Sicherheit eine Zündung verhindert. Gezündet wird durch einen kurzen aber starken positiven Spannungsimpuls (Bild 63).

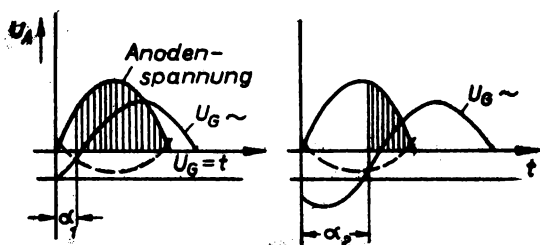


Bild 62: Gittersteuerung mit Wechselspannung

Die Regelung des Gleichstromes geschieht durch Verschieben der Lage des Impulses. In den meisten Fällen wird heute zur Erzeugung der Impulse ein besonderer Steuerungstransformator verwendet, mit dem der Zündzeitpunkt durch einen Regelwiderstand verlagert wird.

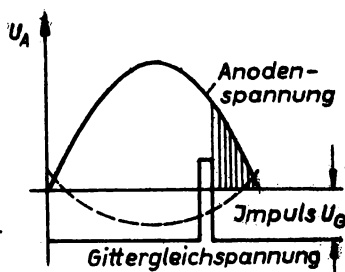


Bild 63: Stoßsteuerung

Neben der einfachen Regelung des Gleichstromes ermöglichen die gittergesteuerten Gleichrichter beliebig hohe Leistungen, ohne jeden Schalter funkenfrei abzuschalten. Es ist nur nötig, an die Gitter der Gleichrichter eine entsprechend hohe negative Spannung anzulegen, so daß eine Zündung nicht mehr erfolgen kann.

3.16 Arten und Anwendungsgebiete

Für kleine und mittlere Leistungen bei Stromstärken bis 500 A kommt der Glasgleichrichter, für große und größte Leistungen

der Eisengleichrichter zur Anwendung. Beim Glasgleichrichter besteht das birnenförmige Gleichrichtergefäß aus Hartglas, die Anoden aus Graphit. Die Anodenarme sind abgewinkelt (Bild 58). Bei Glasgleichrichtern, die längere Zeit im Betrieb sind, schwärzt sich das Glas. Diese Schwärzung beruht auf von der Anode auf die Glaswände niedergeschlagenem Graphit. Sie ist kein Zeichen für das Nachlassen der Gleichrichterwirkung. Bei normaler Belastung beträgt die Lebensdauer eines Glasgleichrichters ca. 10.000 Stunden.

Beim Eisengleichrichter besteht das Entladungsgefäß aus zusammengeschweißten Eisenblechen. Zur Aufrechterhaltung des Vakuums sind besondere Einrichtungen - Vakuumpumpen - erforderlich. Die Kühlung geschieht durch umlaufendes Wasser. Bild 64 zeigt Ihnen eine Eisengleichrichteranlage.

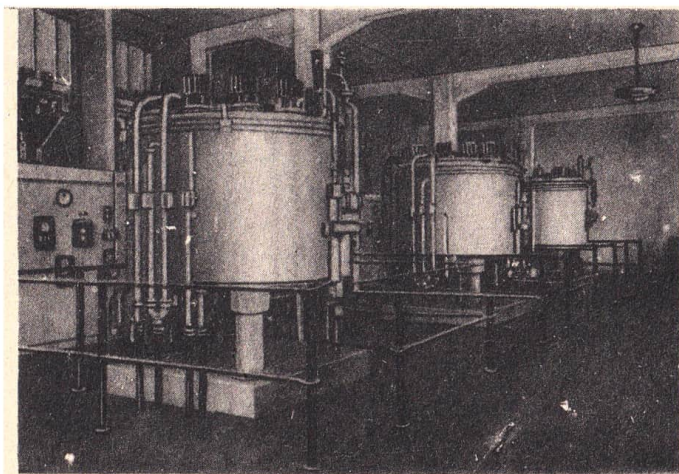


Bild 64: Eisengleichrichteranlage

Für Ströme von 500 ... 1000 A werden pumpenlose Eisengleichrichter hergestellt. Das Entladungsgefäß ist vakuumdicht geschweißt. Die Kühlung geschieht, wie beim Glasgleichrichter, durch einen besonderen Lüfter.

Das Anwendungsgebiet der Quecksilberdampfgleichrichter - besonders das der gittergesteuerten - ist außerordentlich groß. Sie werden überall dort eingesetzt, wo hohe Gleichstromleistungen benötigt werden, wie z.B. in der chemischen Industrie, aber auch in Hütten- und Walzwerken, wo sie den Leonardumformer immer mehr verdrängen. Sie werden weiterhin in Bahnkraftwerken aller Art, in Sendeanlagen, zur Speisung von Schweißmaschinen u.a.m. verwendet.

3.2 Das Thyatron oder Stromtor

3.21 Aufbau des Thyatrons

Befindet sich an Stelle des Quecksilbers (siehe Bild 51) ein Draht aus schwer schmelzbarem Metall, z.B. Wolfram, und wird dieser durch einen Gleich- oder Wechselstrom auf hohe Temperatur gebracht, dann emittiert er ebenfalls Elektronen. Man spricht in diesem Falle von einer Glühemission und bezeichnet eine solche Kathode als Glühkathode. Bei Reinmetallkathoden tritt die Emission erst bei sehr hohen Temperaturen ein. Andere Stoffe, wie z.B. die Oxyde der Erdalkalimetalle, haben bei niedrigeren Temperaturen - etwa 800° - eine wesentlich höhere Elektronenemission. Deshalb bringt man eine solche Oxydschicht entweder unmittelbar auf den Heizfaden auf oder auf ein Nickelröhrchen, das den Heizfaden umgibt. Im ersten Falle spricht man von der direkt geheizten Oxydkathode. Die unmittelbar geheizte Kathode hat den Vorteil, daß die erforderliche Betriebstemperatur sehr schnell erreicht wird. Bei der indirekt geheizten Kathode (Bild 65) dient der Wolframdraht nur als Heizdraht zur Erzeugung der erforderlichen Betriebstemperatur. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß die Elektronenemission gleichmäßiger und die Kathode gegen Überlastungen weniger empfindlich ist. Nachteilig ist die längere

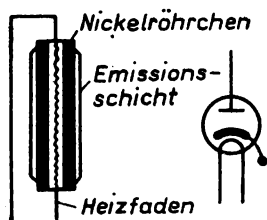
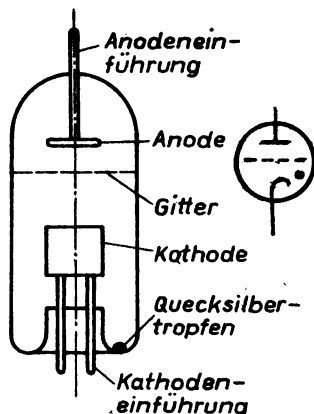


Bild 65: Aufbau und Schaltzeichen der indirekt geheizten Glühkathode

Anheizzeit.

Beim Thyatron befindet sich die indirekt geheizte Oxydkathode in einem mit Dampf gefüllten Glasgefäß, in dem noch die Anode und das Gitter untergebracht sind. Bild 66 zeigt den Aufbau und das Schaltzeichen. Die Verdampfungstemperatur des Quecksilbers wird durch die Kathodenheizung erreicht.



3.22 Wirkungsweise

Die Wirkungsweise des Thyatrons ist genau so wie die des Quecksilberdampfgleichrichters. Wie bei diesem kann durch eine entsprechende

Bild 66: Aufbau eines Glühkathodengleichrichterrohres mit Quecksilberdampfzuführung und Schaltzeichen

Gitterspannung der Zündzeitpunkt verlagert werden. Im Gegensatz zum Quecksilberdampfgleichrichter kann man dem Thyatron nicht beliebig hohe Ströme entnehmen, da die Kathode nur eine bestimmte Ergiebigkeit hat. Thyatrons werden für Stromstärken bis zu etwa 120 A hergestellt.

3.23 Anwendung

Das Thyatron wird neben anderen vor allem zur Drehzahländerung bei elektromotorischen Antrieben verwendet. Das Prinzip einer elektronischen Motorsteuerungsanlage zeigt Ihnen schematisch Bild 67.

Der dem Netz entnommene Wechsel- oder Drehstrom wird über einen Transformator einem mit Thyatrons bestückten Gleichrichter zugeführt. Diesem werden die für den Betrieb eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors erforderlichen Spannungen für den Anker und das Feld entnommen. Die Größe dieser Spannungen, die zur Erreichung der jeweils gewünschten Eigenschaften des

Antriebes erforderlich ist, geschieht durch ein besonderes elektronisches Steuergerät. Die Änderung der Drehzahl, des Drehmomentes, der Leistung usw. kann entweder vollautomatisch erfolgen oder - wie in Bild 67

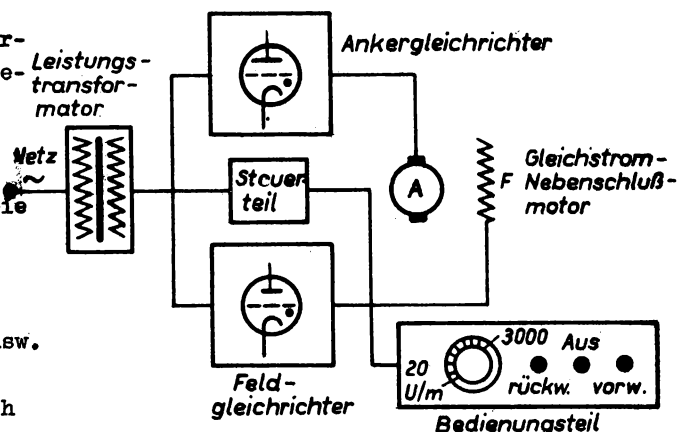


Bild 67: Blockschaltbild einer elektronischen Motorsteuerungsanlage

angegeben - durch einfache kleine Potentiometer, da alle Regelvorgänge schwachstrommäßig gesteuert werden.

Zusammenfassung

Beim Quecksilberdampfgleichrichter emittiert die heiße aus Quecksilber bestehende Kathode Elektronen, die auf ihrem Weg zur positiven Anode die Gasmoleküle des Quecksilberdampfes ionisieren.

Durch den Ionenstrom, der dem Elektronenstrom entgegengesetzt gerichtet ist, wird die Wirkung der Raumladung kompensiert.

Durch die Zündung wird die Kathode auf die erforderliche Betriebstemperatur gebracht. Zur Aufrechterhaltung des Hauptlichtbogens sind Hilfsanoden vorhanden.

Rückzündungen, die einem Kurzschluß gleichkommen, können durch mangelhafte Kühlung oder lang andauernde Überbelastungen entstehen.

Mit Hilfe des Gitters - einer Elektrode, die zwischen Kathode und Anode liegt, läßt sich der Zündeneinsatz des Quecksilberdampfgleichrichters steuern. Durch Veränderung der Gitter-

spannung wird die Anodenhalbwelle mehr oder weniger ausgenutzt und damit der Anodenstrom reguliert.

Gittergesteuerte Quecksilberdampfgleichrichter gestatten die funkenfreie Abschaltung sehr großer Leistungen mit sehr kleinem Leistungsbedarf.

Glasgleichrichter werden bis 500 A verwendet. Von 500...1000 A werden die pumpenlosen, darüberhinaus die mit besonderen Evakuierungseinrichtungen versehenen Eisengleichrichter eingesetzt.

Das Thyatron oder Stromtor ist ein Glühkathodengleichrichter mit meist indirekt geheizter Oxydkathode und Quecksilberdampf-füllung. Es gestattet die Entnahme von Strömen bis 120 A. Überlastungen führen zur Zerstörung der Kathode.

Die Wirkungsweise des Thyatrons ist dieselbe wie die des Quecksilberdampfgleichrichters. Es findet neben anderen ausgedehnte Verwendung zur elektronischen Drehzahlstellung.

Ü b u n g e n

35. Welche Bedeutung hat die Ionisierung bei gasgefüllten Entladungsgefäßen?
36. Welche Aufgabe hat die Zündung bei einem Quecksilberdampfgleichrichter und wie ist ihre grundsätzliche Wirkungsweise?
37. Wie kann beim Quecksilberdampfgleichrichter die Spannung geregelt werden?
38. Was versteht man unter einem Thyatron oder Stromtor?
39. Warum kann ein Thyatron nicht für beliebig hohe Stromstärken benutzt werden?
40. Welche Vorteile hat die Steuerung elektrischer Antriebe mit Hilfe von Thyatrons?

ANTWORTEN UND LÖSUNGEN

1. Wechselstromgeneratoren mit Einzelpollläufern kommen bei kleinen Antriebsdrehzahlen zur Anwendung, während Induktoren bei hohen Drehzahlen verwendet werden.

Bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten muß der Läufer als Volltrommelläufer ausgeführt sein. Das Polrad würde infolge seines größeren Durchmessers den hohen Fliehkräften nicht standhalten und auseinanderfliegen.
2. Weil bei der Innenpolmaschine der Wechselstrom in der Ständerwicklung erzeugt wird, können sehr hohe Spannungen und große Leistungen dem Generator ohne besondere Schwierigkeiten entnommen werden.
3. Beim Parallelschalten eines Drehstromgenerators müssen die Spannungen, die Frequenzen, die Phasenfolge und die Phasenlagen übereinstimmen.
4. Der Generator gibt nur dann Wirkleistung ins Netz ab, wenn die Leistung der Antriebsmaschine erhöht wird.
5. Eine Änderung der Erregung hat keinen Einfluß auf die Antriebsmaschine. Durch Änderung des Erregerstromes wird lediglich eine Verteilung der Blindlast herbeigeführt.
6. Die Drehzahl des Synchronmotors hängt von der Polzahl und der Frequenz ab.
7. Das schnell umlaufende Drehfeld kann die Masse des Polrades nicht in Bewegung bringen.
8.

Vorteile	Nachteile
guter Leistungsfaktor,	Motor läuft nicht von selbst an,
guter Wirkungsgrad,	Motor muß durch Gleichstrom erregt werden,
Motor ist überlastbar.	die Drehzahl läßt sich nicht ändern,

8. Nachteile (Fortsetzung)
bei starker Überlastung
fällt der Motor "außer Tritt".
9. Ein Transformator ist ein Umspanner, der eine gegebene Wechselspannung in eine andere Wechselspannung bei gleichbleibender Frequenz umwandelt.
10. Zum Betrieb eines Transformators ist ein Wechselfeld nötig, das der Gleichstrom nicht erzeugt.
11. Unter dem Übersetzungsverhältnis versteht man das Verhältnis der Windungszahlen bzw. der Spannungen.
12. Beim Manteltransformator umgibt das Eisen die Spule, beim Kerntransformator die Spulen das Eisen. Beim Manteltransformator hat der Mittelschenkel den doppelten Querschnitt eines Außenschenkels.
13. Wärme wird durch den Strom in den Wicklungen, durch die Wirbelströme im Eisen und durch die Reibung bei der Umagnetisierung erzeugt.
14. Unter der Kurzschlußspannung versteht man die Spannung, die bei kurzgeschlossener Sekundärseite angelegt werden muß, damit in der Primärwicklung der Nennstrom fließt.
15. Die parallel zu schaltenden Transformatoren müssen haben:
1. gleiches Übersetzungsverhältnis,
 2. gleiche Kurzschlußspannungen,
 3. gleiche Schaltgruppen.
16. Vorteile: Einsparung von Wickelmaterial und Eisen, kleine Kurzschlußverluste.
Nachteile: Ober- und Unterspannungswicklung sind leitend miteinander verbunden.
17. 1. $N_1 = 396 \text{ W}$
2. $I_2 = 0,9 \text{ A}$
3. $U_2 = 440 \text{ V}$

$$18. N_{s_{\text{Mot}}} = 41\,600 \text{ VA} \quad N_{\text{ofen}} = 8 \text{ kVA}$$

Scheinleistung des Transformators $N_g = 50 \text{ kVA}$.

19. Im Läufer muß sowohl bei Leerlauf als auch bei Belastung ein Drehmoment im Sinne des Drehfeldes entstehen. Das ist aber nur möglich, wenn in der Läuferwicklung ein Strom fließt. Ein Strom kann aber nur dann entstehen, wenn eine Spannung vorhanden ist, d.h. wenn Kraftlinien geschnitten werden. Das Kraftlinienschneiden kann nur bei asynchroner Drehzahl stattfinden.

$$20. \sigma = 3,5 \%$$

$$21. n = 1430 \text{ min}^{-1}$$

$$22. 220/380 \text{ V}$$

23. Sinkt die Spannung um die Hälfte, dann sinkt der Fluß und damit auch der Läuferstrom um die Hälfte. Für das Drehmoment gilt $M = c \cdot \Phi \cdot I_A$, also wird

$$M = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot \frac{1}{2} I_A = c \cdot \frac{1}{4} \cdot \Phi \cdot I_A$$

$$24. I_{\text{ph}} = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{17,3}{\sqrt{3}} = 10 \text{ A}$$

25. Bei 380 V und Sternschaltung ist in der Zuleitung dieselbe Stromstärke wie in einer Statorwicklung, nämlich 17,3 A, vorhanden.

26. Gegenüber Drehstrommotoren mit Rundstabläufern haben solche mit Stromverdrängungsläufern den Vorteil, daß sie ein höheres Anlaufmoment bei kleinerem Einschaltstrom haben.

27. Die Drehzahl des Asynchronmotors ist an die Frequenzdrehzahl gebunden. Daher ist eine stufenlose Änderung der Drehzahl nicht einfach möglich.

28. Im Anlasser wird ein Teil der Nutzleistung in Wärme umgesetzt, außerdem wird das Anlaufmoment durch den Ständer-

anlasser verringert. Belastungsänderungen haben Drehzahländerungen zur Folge.

29. Ein schlechter Leistungsfaktor bei Antrieben mit Asynchronmotoren wird vermieden, wenn die Antriebsmotoren mit Vollast laufen und Schnellläufer sind.
30. Bei Wechselstromanschluß ist die Drehzahl um das $\cos \varphi$ -fache kleiner als bei Gleichstromanschluß.
31. Mit steigender Belastung fällt das Drehmoment. Bei Leerlauf geht er durch. Die Drehzahl kann durch einen Vorwiderstand geändert werden, allerdings wird dadurch das Drehmoment herabgesetzt.
32. Der Motor läuft als läufergespeister Drehstrom-Asynchronmotor, weil bei dieser Bürstenstellung die Ständerwicklung kurzgeschlossen ist.
33. Die Drehrichtungsänderung geschieht durch Vertauschen zweier Zuleitungen und durch Bürstenverschiebung über die Nullstellung in entgegengesetzter Richtung.
34. Die Stromwendermotoren gestatten weitgehende und verlustlose Drehzahländerung.
35. Durch die Ionisierung wird die Wirkung der Raumladung kompensiert.
36. Durch die Zündung wird die Quecksilberkathode auf die erforderliche Betriebstemperatur gebracht.

Ein Hilfsstromkreis, der über die Zündanode mit der Kathode verbunden ist, wird unterbrochen. Durch den entstehenden Lichtbogen wird die Zündung eingeleitet.
37. Die Gleichspannung kann durch Veränderung der den Anoden zugeführten Wechselspannung oder noch besser durch die Gittersteuerung geregelt werden.

38. Ein Thyratron ist ein Glühkathodengleichrichter mit Dampf-
füllung und Gittersteuerung.
39. Die Kathode des Thyratrons hat nur eine begrenzte Elek-
tronenemission.
40. Die Steuerung elektrischer Antriebe mittels Thyratrons
ist - weil keine Regelwiderstände benötigt werden - wirt-
schaftlich und einfach. Voll- und teilautomatische Rege-
lung ist möglich. Sämtliche Regelvorgänge werden schwach-
strommäßig durch Potentiometereinstellung gesteuert.

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

SCHARF

ELEKTROTECHNIK FÜR NICHT- ELEKTROTECHNIKER

8

HERAUSGEBER
ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAVS-
BILDUNG-BEREICH MASCHINENBAU,
ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE-
D R E S D E N

5030-08/63

1963



ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Elektrotechnik für Nichtelektrotechniker

Lehrbrief 8

von

Ing. Erich Scharf

2. Auflage

Herausgeber:

Zentralstelle für Fachschulausbildung

Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,-

Ag 616/ 176 /63

Best-Nr. 5030-08/63

III, 9/278

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
4. Der elektrische Antrieb	3
4.1 Grundlagen für die Bemessung der Motoren	3
4.1.1 Die Betriebsarten	3
4.1.2 Die Anpassung des Drehmomentes	7
4.1.3 Drehmomente beim elektromoto- rischen Antrieb	7
4.1.4 Drehmomentkennlinien des Motors und der Arbeitsmaschine	8
4.1.5 Stationärer Betrieb	10
4.1.6 Nichtstationärer Betrieb	12
4.1.7 Die Bestimmung der Motorleistung	15
5. Tarifrager	23
5.1 Tarife	23
5.2 Maßnahmen zur Verbesserung des $\cos \varphi$	25
6. Schaltgeräte für Niederspannungsanlagen	29
6.1 Schütze	29
6.2 Schutzschalter	32
6.2.1 Überstromschalter	32
6.2.2 Unterspannungsschalter	34
6.2.3 Rückstromschalter	34
6.2.4 Motorschutzschalter	34
7. Schutzmaßnahmen in Niederspannungsanlagen	36
7.1 Allgemeines	36
7.2 Isolierung	38
7.3 Kleinspannung	39
7.4 Erdung	39
7.5 Nullung	42
7.6 Schutzschaltung	45
7.7 Unfallquellen	46
Antworten und Lösungen	50

4. Der elektrische Antrieb

4.1. Grundlagen für die Bemessung der Motoren

4.1.1. Die Betriebsarten.

Sie sollen für zwei verschiedene Antriebe, die die gleiche Antriebsleistung benötigen, die entsprechenden Motoren aussuchen. Die beiden Antriebe unterscheiden sich nur durch ihre Benutzungsdauer. Während der erste mehrere Stunden hindurch dauernd in Betrieb ist, wird der zweite nur kurzzeitig und mit langen Unterbrechungen benutzt. Werden Sie nun Motoren mit gleicher Nennleistung wählen?

Erinnern Sie sich, daß für die Belastbarkeit elektrischer Maschinen die Erwärmung maßgebend ist, d.h. also, daß bei stärkerer Belastung ein und derselben Maschine unter sonst gleichen Bedingungen ihre Endtemperatur höher ist als bei schwächerer. Verfolgen Sie den Temperaturverlauf einer elektrischen Maschine bei gleicher Belastung und gleichbleibenden Wärmeverlusten $I^2 \cdot R$, dann stellen Sie fest, daß die Temperatur in der ersten Zeit sehr schnell ansteigt, dann langsamer und schließlich die sog. Beharrungstemperatur erreicht, also nicht weiter steigt (Bild 1).

Wie kommt das? Bei der Beharrungstemperatur ist die Wärmeenergieabgabe gleich der erzeugten Wärmeenergie. Bis die Beharrungstemperatur erreicht ist, dient der Unterschied zwischen erzeugter Wärmeenergie und Wärmeenergieabgabe zur Erwärmung der Massen der Maschine. Sie folgern richtig,

wenn Sie sagen, daß bei großen Massen der Maschine die Zeit des Temperaturanstiegs von der Umgebungs- bis zur Beharrungstemperatur größer ist als bei kleinen Maschinen.

Die Dauerleistung einer elektrischen Maschine entspricht nun

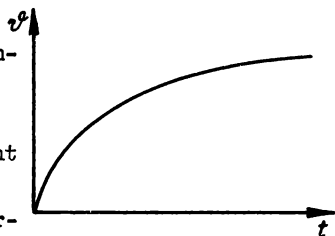


Bild 1
Temperaturverlauf

der Leistung, bei der die Beharrungstemperatur gleich der zulässigen Grenztemperatur ist. Hieraus folgt:

Die Dauerleistung einer elektrischen Maschine ist umso größer, je niedriger die Umgebungs- oder Kühlmitteltemperatur ist.

Die auf den Leistungsschildern der Maschinen angegebenen Nennleistungen entsprechen einer Umgebungs- oder Kühlmitteltemperatur von 40°C . Bei höherer Temperatur als 40°C muß die auf dem Leistungsschild angegebene Dauerleistung herabgesetzt werden.

Kehren wir zu der anfangs gestellten Frage zurück. Daß bei dem zweiten Antrieb infolge der kurzzeitigen Belastung die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, dürfte Ihnen klar sein. Das bedeutet aber, daß Sie für diesen Antrieb einen Motor geringerer Leistung einsetzen können, der dabei allerdings kurzzeitig überlastet wird. Kurzzeitige Überlastungen, die die Dauer von 2 Minuten nicht überschreiten, sind zulässig. In solchen Fällen wird die Motorgröße nicht mehr durch die Erwärmung, sondern durch die Höhe des Anlaufmomentes bestimmt.

Die Überlastbarkeit beträgt etwa für

normale Kurzschlußläufermotoren	$(1,8 \dots 2) M_n$,
Doppelkäfig- oder Tiefnutläufer	$(1,8 \dots 2,7) M_n$,
Schleifringläufer	$(2 \dots 2,5) M_n$,
Gleichstrommotoren	$2 M_n$,
Wechselstrom-Kommutatormotoren	$(1,6 \dots 1,8) M_n$,

wobei M_n das Nenn Drehmoment ist. Das Kippmoment darf dabei natürlich nicht erreicht werden, bei Kommutatormotoren muß außerdem noch die Kommutierung einwandfrei sein.

Nach VDE 0530 unterscheidet man:

Dauerbetrieb (DB): Die Betriebszeit ist so lange, daß die dem Beharrungszustand entsprechende Endtemperatur erreicht wird. Die Dauerleistung ist beliebig lang, ohne daß die Erwärmung die für die Isolation zugelassenen Grenzwerte überschreitet (Bild 2 a)

Kurzzeitiger Betrieb (KB): Die durch Vereinbarung bestimmte Betriebszeit - 10, 30 oder 60 Minuten - ist so kurz, daß die Beharrungstemperatur nicht überschritten wird. Die Betriebspause, während der die Maschine spannungslos ist, ist lang genug, daß sie sich auf die Temperatur des Kühlmittels (z.B. der umgebenden Luft) abkühlt (Bild 2 b).

Dauerbetrieb mit kurzzeitiger Belastung (DKB): Die vereinbarte Belastungszeit ist so kurz, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird. Die Pause zwischen den Belastungen, während der die Maschine leer läuft, ist lang genug, daß die Abkühlung auf die Beharrungstemperatur bei Leerlauf erreicht wird (Bild 2 c).

Aussetzender Betrieb (AB): Die Einschaltzeiten wechseln mit spannungslosen Pausen ab, deren Dauer nicht genügt, daß die Abkühlung auf die Temperatur des Kühlmittels erreicht wird (Bild 2 d).

Dauerbetrieb mit aussetzender Belastung (DAB): Die Belastungszeiten wechseln mit Leerlaufpausen ab, deren Dauer nicht genügt, um die Abkühlung auf die Beharrungstemperatur bei Leerlauf zu erreichen (Bild 2 e).

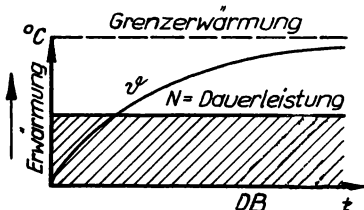


Bild 2 a

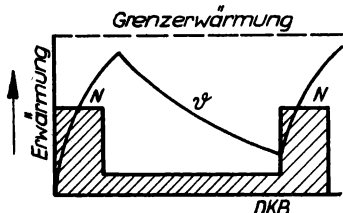


Bild 2 c

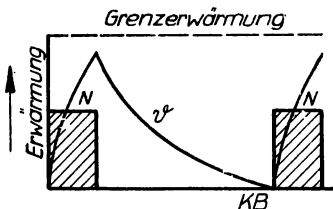


Bild 2 b

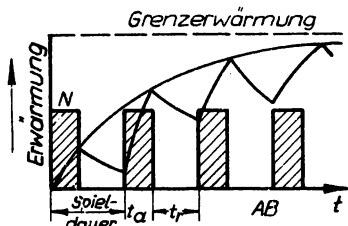


Bild 2 d

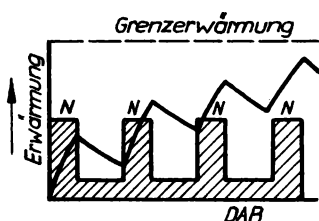


Bild 2 e

Sonderfälle des DAB- und AB-Betriebes sind der Durchlaufschaltbetrieb (DSB) und der Ausschaltbetrieb (ASB). Bei diesen Betriebsarten wird die Erwärmung der Maschine hauptsächlich durch den Anlauf und die Bremsung bestimmt. Bei DSB wird der mit der Nennleistung belastete Motor in regelmäßiger oder unregelmäßiger Folge geschaltet. Bei ASB wechseln

Belastungszeiten mit Nennleistung und Schaltungen mit Pausen ab, in denen die Maschine spannungslos ist. Die Dauer der Pausen genügt nicht, die Maschine auf Kühlmitteltemperatur abzukühlen.

Aus Bild 2 erkennen Sie deutlich die Unterschiede zwischen KB und AB und zwischen DKB und DAB. Die Betriebsart KB kommt z.B. bei Motoren zum Antrieb von Drehscheiben, zur Betätigung von Schleusenmotoren u.a. in Frage; AB ist bei Aufzügen, Förderkränen usw. vorhanden. Motoren für kurzzeitigen und aussetzenden Betrieb dürfen - auch nicht mit verringerter Leistung - für Dauerbetrieb nicht verwendet werden.

Die Betriebsarten AB und DAB sind durch die relative Einschalt-dauer ED gekennzeichnet. Unter der relativen Einschaltdauer versteht man das Verhältnis

$$ED = \frac{\text{Belastungsdauer}}{\text{Spieldauer}}$$

Die Spieldauer setzt sich aus der Einschaltzeit t_a und spannungsloser Pause t_r bzw. Belastungszeit und Leerlaufpause zusammen (Bild 2 d). Die Spieldauer darf höchstens 10 Minuten betragen. Es ist also

$$ED\% = \frac{t_a}{t_a + t_r} \cdot 100$$

Normale Werte der relativen Einschaltdauer sind 20, 40 und 60%. Es bedeutet z.B. 40% ED: Der Motor ist 4 Minuten eingeschaltet, die Pause beträgt 6 Minuten; oder er ist 2 Sekunden eingeschaltet, während die Pause 3 Sekunden beträgt usw.

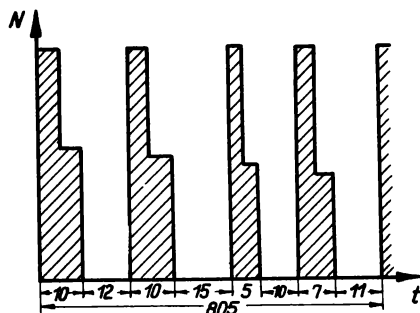


Bild 3 zeigt die Darstellung für 40% ED.

Lehrbeispiel 1

Wie groß ist die relative Einschaltdauer eines Motors, bei dem die Summe aller Einschaltzeiten

1,5 Stunden beträgt und bei einer täglichen Arbeitszeit von 8 Stunden gleichmäßig verteilt sind?

Lösung :

$$t_a = 1,5 \text{ Std.}$$

$$t_a + t_r = 8 \text{ Std.}$$

$$ED = \frac{t_a}{t_a + t_r} \cdot 100 = \frac{1,5}{8} \cdot 100 = 18,75\%$$

Laut Liste wäre ein Motor mit 20% ED zu wählen.

4.1.2 Die Anpassung des Drehmomentes

Wenn Sie für einen Antrieb den geeignetsten Elektromotor auswählen sollen, müssen Sie nicht nur die Eigenschaften der verschiedensten Motoren kennen, sondern auch die Eigenschaften der Arbeitsmaschine.

4.1.3 Drehmomente beim elektromotorischen Antrieb

Bild 4 zeigt Ihnen schematisch den elektromotorischen Antrieb einer Arbeitsmaschine. Der Elektromotor EM erzeugt das Drehmoment M, dem das Moment der Arbeitsmaschine, das Widerstands-

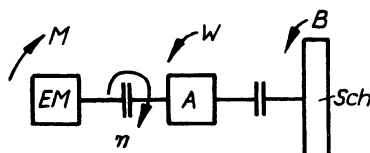


Bild 4
Schema einer elektromotorisch angetriebenen Arbeitsmaschine

moment oder das statische Gegenmoment W entgegenwirkt. Beim Anfahren und beim Bremsen müssen noch die bewegten Massen beschleunigt bzw. verzögert werden. Sie sind im Schema durch das Schwungrad Sch angedeutet. Das durch sie hervorgerufene Moment heißt Beschleunigungs-, Überschuß- oder dynamisches Moment M_{ii} . Bezieht man alle Momente auf die Motorendrehzahl n , dann gilt:

$$M + W + M_{ii} = 0.$$

Jedes dieser Momente kann treibend oder bremsend wirken. So wirkt das Drehmoment eines Motors zum Antrieb einer Bohrmaschine treibend, das Widerstandsmoment der Bohrmaschine bremsend. Bei der Talfahrt eines elektrischen Triebwagens läuft der Motor als Generator. Jetzt wirkt das Motordrehmoment bremsend, das Widerstandsmoment treibend. In welchen Fällen das Beschleunigungsmoment treibend oder bremsend wirkt, können Sie selbst feststellen.

Die Beschleunigung bzw. die Verzögerung der bewegten Massenteile kann nur bei veränderlicher Drehzahl eintreten. Wann ändert sich aber die Drehzahl? Ihre Überlegung ist richtig, wenn Sie sagen beim Anlauf, beim Bremsen, bei der Drehrichtungsänderung oder Reversierung und in allen den Fällen, wo eine Drehzahländerung betriebsmäßig herbeigeführt werden muß. Alle diese Zustände bezeichnet man als Übergangszustände oder nichtstationären Betrieb. Beim stationären Betrieb bleibt die Drehzahl konstant, d.h. ein Beschleunigungsmoment ist nicht vorhanden. Demnach gilt

$$M + W = 0.$$

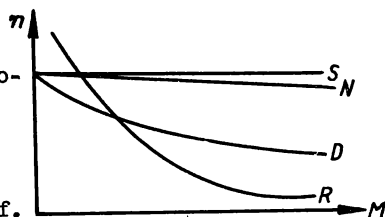
4.1.4 Drehmomentkennlinien des Motors und der Arbeitsmaschine

Zur richtigen Auswahl des Motors hinsichtlich des Drehmomentes muß man die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl sowohl vom Motor als auch von der Arbeitsmaschine kennen. Die mechanischen Charakteristiken der Motoren, die diese Abhängigkeit darstellen, sind Ihnen von der Besprechung der Mo-

toren her bekannt. Wir stellen sie noch einmal zusammen.

1. Das Synchronverhalten: Die Drehzahl bleibt gleich; sie ist unabhängig von der Belastung (Synchronmotor).
2. Das Nebenschluß- und Doppelschlußverhalten: Die Drehzahl ändert sich nur wenig mit zunehmender Belastung. Das Drehzahlverhalten ist hart. - Eine etwas weichere mechanische Charakteristik hat der Doppelschlußmotor (Gleichstrom-Nebenschlußmotor, Drehstrom-Nebenschlußmotor und Asynchronmotor).
3. Das Reihenschlußverhalten: Die Drehzahl ändert sich stark mit der Belastung; bei Leerlauf geht die Maschine durch (Gleichstrom-Reihenschlußmotor, Drehstrom-Reihenschlußmotor).

In Bild 5 sind die genannten mechanischen Charakteristiken der Elektromotoren dargestellt.



Die Kennlinien der Arbeitsmaschinen haben häufig einen ähnlichen Verlauf. Man unterscheidet bei ihnen folgende Fälle, die meist nicht rein, sondern zusammengesetzt vorhanden sind:

Bild 5

Mechanische Charakteristiken der Elektromotoren

1. Das Widerstandsmoment ist konstant und unabhängig von der Belastung. Es wird wie in Bild 6 durch eine senkrechte Gerade W_1 dargestellt. Alle Arbeitsmaschinen mit reiner Reibungsarbeit, wie z.B. Papiermaschinen, Dreh- und Bohrmaschinen, Hebezeuge (Kräne, Winden, Fördermaschinen), Kolbenpumpen bei konstantem Gegendruck u.a., haben eine solche Charakteristik.
2. Das Widerstandsmoment steigt quadratisch mit der Drehzahl an. Das ist z.B. der Fall bei Lüftern, Kreiselpumpen, Schiffspropellern u.a., also bei Arbeitsmaschinen, bei denen ein Luft- oder Flüssigkeitswiderstand zu überwinden ist. Die Kurve W_2 in Bild 6 zeigt die Charakteristik einer

solchen Arbeitsmaschine.

3. Das Widerstandsmoment wächst proportional mit der Drehzahl, wie es z.B. beim Antrieb eines Gleichstromgenerators mit Fremderregung vorkommt, dessen äußerer Widerstand konstant ist (W_3 in Bild 6).

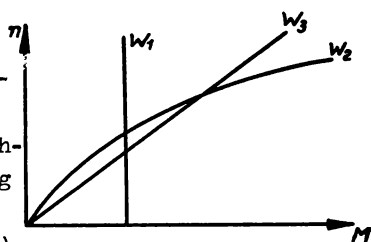


Bild 6
Charakteristiken
von Arbeitsmaschinen

4.1.5. Stationärer Betrieb

Eine bestimmte Drehzahl kann ein mit der Arbeitsmaschine direkt gekuppelter Motor nur dann beibehalten, wenn er das bei dieser Drehzahl erforderliche Drehmoment hervorbringt, mit anderen Worten, wenn das bei dieser Drehzahl erforderliche Drehmoment des Motors gleich dem Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine ist. Zeichnet man also die Drehmomentenlinie M des Motors und die Charakteristik W der Arbeitsmaschine zusammen

auf, dann stellt der Schnittpunkt B beider Kennlinien den Betriebspunkt dar (Bild 7). Ändert sich aus irgendeinem Grunde eine der beiden Kennlinien, dann ist der Gleichgewichtszustand zwischen beiden Momenten nicht mehr vorhanden. Was geschieht, wenn z.B. das Widerstandsmoment für kurze Zeit kleiner wird? Aus Bild 7 erkennen Sie, daß in diesem Falle die Drehzahl größer wird. Bei einer Vergrößerung des Widerstandsmomentes sinkt umgekehrt die Dreh-

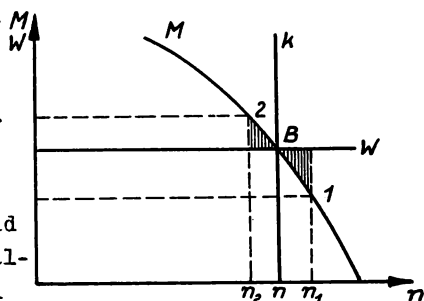


Bild 7
Stabiler Betrieb

zahl (Punkte 1 und 2). Die Drehzahländerung ist bedeutungslos, wenn nach Ablauf der Störung der Gleichgewichtszustand zwischen den beiden Momenten wieder hergestellt wird. Das ist aber nur dann möglich, wenn bei einer Drehzahlerhöhung das

Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine überwiegt, bei einem Drehzahlabfall das Motordrehmoment. Ist das der Fall, dann bezeichnet man einen solchen Betrieb als stabil.

Je steiler die Motorenkennlinie verläuft, um so schneller wird bei einer vorübergehenden Störung der Gleichgewichtszustand wieder erreicht. Beim Synchronmotor verläuft die Kennlinie senkrecht. Bei allen Belastungen bleibt, wie Sie ja wissen, die Drehzahl konstant, so lange nicht das Kippmoment K , das durch den höchsten Punkt der Momentenlinie bestimmt ist, überschritten wird.

Verläuft dagegen die Kennlinie wie in Bild 8, also von links nach rechts steigend, ist der Betrieb nicht mehr stabil, sondern labil. Das bedeutet, daß ein geringer Drehzahlabfall ein weiteres Abfallen der Drehzahlen bis zum Stillstand zur Folge hat. Ebenso verursacht eine geringe Drehzahlsteigerung ein weiteres Hochlaufen, das zur Beschädigung der Arbeitsmaschine oder auch des Motors führen kann.

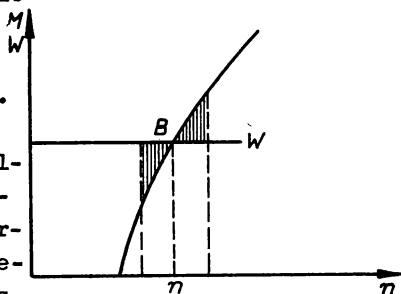


Bild 8
Labiler Betrieb

Soll die Arbeitsmaschine einmal mit der Drehzahl n_1 , das andere Mal mit der Drehzahl n_2 betrieben werden (Bild 9), dann muß die Motorkennlinie einmal durch den Betriebspunkt B_1 und zum anderen durch den Betriebspunkt B_2 laufen. Das ist jedoch nur möglich, wenn der Motor regelbar ist, in diesem Falle also 2 Kennlinien hat.

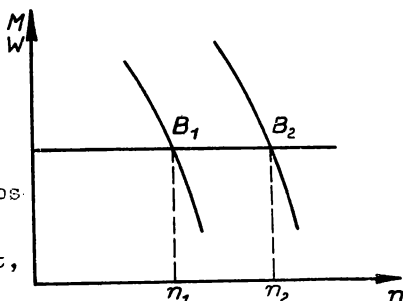


Bild 9

4.1.6 Nichtstationärer Betrieb

Während des Anlaufes muß das Motordrehmoment größer sein als das Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine. In Bild 10 stellt

die Kurve 1 den Verlauf des Drehmomentes eines Kurzschlußläufermotors und die Kurve 2 den des Widerstandsmomentes einer Arbeitsmaschine dar. Die schraffierte Fläche ist ein Maß für die Größe des Beschleunigungsmomentes, das während des Anlaufs möglichst gleich bleiben soll. Es darf nicht zu groß, aber auch

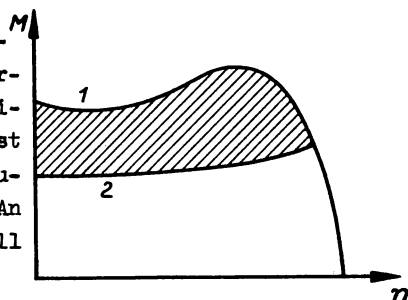


Bild 10

nicht zu klein sein. Wie würde sich wohl ein zu großes Beschleunigungsmoment auswirken? Sie erkennen, daß bei zu großem Beschleunigungsmoment die zu bewegendenden Massen in kürzester Zeit auf ihre Nenndrehzahl gebracht werden. Hierdurch können Maschinenteile, wie z.B. Zahnräder, Kupplungen u.a., beschädigt werden. Beim Riemenantrieb entsteht großer Riemenschlupf, der die Erzeugung von Reibungselektrizität zur Folge haben kann und auch häufig zum Abspringen des Riemens führt. Bei einem Antrieb mit zu großem Beschleunigungsmoment spricht man von einem harten Anlauf. Ein zu kleines Beschleunigungsmoment verlängert die Anlaufzeiten, damit den Ablauf des technologischen Prozesses und kann zur Gefährdung von Motor und Anlaßgerät führen.

Das Überschußmoment wird mit der Ihnen aus der Mechanik bekannten Gleichung bestimmt:

$$M = I \cdot \epsilon = I \cdot \frac{\omega}{t}$$

Setzen Sie für $I = \frac{G}{g} \cdot r^2$ und für $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ ein, so erhalten Sie

$$M = \frac{G}{g} \cdot r^2 \cdot \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot t}$$

Drücken Sie den Trägheitsradius r durch den halben Trägheitsdurchmesser D aus, so geht die Gleichung über in

$$M = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot t}$$

oder mit $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$M = \frac{G \cdot D^2 \cdot n}{375 \cdot t} \quad (1)$$

GD^2 ist die Summe der Schwungmomente aller bewegten Teile und t die Anlaufzeit in Sekunden. Die einzelnen Schwungmomente lassen sich aber nur dann einfach addieren, wenn alle Schwungmassen dieselbe Drehzahl haben. Bei einem Antrieb, bei dem ein Motor eine Arbeitsmaschine über ein Vorgelege antreibt, sind die Drehzahlen der Vorgelegewellen bzw. der Arbeitsmaschine gegenüber der Motorwelle verschieden. Hier müssen dann Drehmomente und Massen der einzelnen Glieder auf die Motordrehzahl reduziert werden.

Die Bewegungsenergie ist:

$$\frac{I}{2} \cdot \omega^2 = \frac{I_1}{2} \cdot \omega_1^2 + \frac{I_2}{2} \cdot \omega_2^2 + \frac{I_3}{2} \cdot \omega_3^2 + \dots$$

Hieraus folgt:

$$I = I_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + I_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega^2} + I_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega^2} + \dots$$

oder, wenn die Trägheitsmomente durch die Schwungmomente und die Winkelgeschwindigkeiten durch die Drehzahlen ersetzt werden

$$GD^2 = G_1 \cdot D_1^2 \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 + G_2 \cdot D_2^2 \left(\frac{n_2}{n}\right)^2 + G_3 \cdot D_3^2 \left(\frac{n_3}{n}\right)^2 + \dots$$

Geradlinig bewegte Massen können durch eine gedachte, sich mit der Motordrehzahl drehenden Masse ersetzt werden. Es muß dann sein:

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{I}{2} \cdot \omega^2$$

Hieraus folgt

$$I = m \left(\frac{v}{\omega}\right)^2$$

oder

$$GD^2 = 4 \cdot g \cdot \frac{G}{g} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{30}{\pi \cdot n}\right)^2 = \frac{365 \cdot G \cdot v^2}{n^2}$$

Die Anlaufzeit ergibt sich aus Gleichung 1 zu

$$t = \frac{G \cdot D^2 \cdot n}{375 \cdot M}$$

Lehrbeispiel 2

Ein Elektromotor hat eine Leistung von 7,5 kW. Seine Drehzahl ist $n = 1440 \text{ min}^{-1}$. Das Schwungmoment des Läufers ist $1,3 \text{ kpm}^2$. Die auf der gleichen Welle beweglich angeordneten Massen der Arbeitsmaschine haben ein Schwungmoment von 1 kpm^2 . Wie groß ist die Anlaufzeit des Antriebes?

L ö s u n g :

$$t = \frac{G \cdot D^2 \cdot n}{375 \cdot M}$$

$$M = 975 \frac{N}{n} = 975 \cdot \frac{7,5}{1440} = 5,08 \text{ kp}$$

$$GD^2 = G_1 \cdot D_1^2 + G_2 \cdot D_2^2 = 1,3 \text{ kpm} + 1 \text{ kpm} = 2,3 \text{ kpm}$$

$$t = \frac{2,3 \cdot 1440}{375 \cdot 5,08} = 1,74 \text{ s}$$

=====

Lehrbeispiel 3

Ein Laufkran soll in 8 s eine Fahrgeschwindigkeit von 100m/min erreichen. Der Antriebsmotor läuft mit $n = 700 \text{ min}^{-1}$. Das gesamte auf die Motordrehzahl bezogene Schwungmoment aller rotierenden Teile wurde zu 155 kpm, das Widerstandsmoment der Seiltrommel zu 36 kpm bestimmt. Welche Nennleistung in kW muß der Motor haben, wenn das Anfahren mit dem doppelten Motordrehmoment erfolgen soll?

L ö s u n g :

$$2 M = W + M_u$$

$$M_u = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot t} = \frac{155 \cdot 700}{375 \cdot 8} = 36,2 \text{ kpm}$$

$$2 M = 36 \text{ kpm} + 36,2 \text{ kpm} = 72,2 \text{ kpm}$$

$$M = \frac{72,2 \text{ kpm}}{2} = 36,1 \text{ kpm}$$

$$N_N = M \cdot \frac{n}{975} = 36,1 \cdot \frac{700}{975} = \sim 26 \text{ kW}$$

=====

4.1.7 Die Bestimmung der Motorleistung

Maßgebend für die Bestimmung der Motorleistung ist die Ihnen bekannte Gleichung

$$N = \frac{M \cdot n}{975 \cdot \eta} ,$$

worin M das Gegendrehmoment und η der Wirkungsgrad ist. Die Leistung des einzusetzenden Motors ist etwas größer zu wählen, damit ein einwandfreier Anlauf erreicht und das Gegendrehmoment sicher überwunden wird. Es ist aber darauf zu achten, daß die Leistung des Motors nicht zu groß gewählt wird. Der Motor wäre dann nicht voll belastet. Welche Folgen das auf Wirkungsgrad und Leistungsfaktor hat, ist Ihnen bekannt.

Bei Hobelmaschinen, Sägen und anderen Maschinen treten - auch im Dauerbetrieb - Belastungsschwankungen auf, die bei der Wahl der Motorgröße berücksichtigt werden müssen, wenn diese Schwankungen nicht regelmäßig erfolgen und gering sind. Es wäre falsch, wenn man die Motorgröße nach der mittleren Leistung oder nach dem mittleren Strom bestimmte, weil dann die Erwärmung nicht ausreichend berücksichtigt würde.

Sie wissen, daß die in einem Motor erzeugte Wärmemenge von den Verlusten abhängt. Die Reibungs- und Eisenverluste sind bei konstanter Drehzahl konstant, während die Stromwärmeverluste sich quadratisch mit dem Strom ändern. Ersetzt man nun den im Motor wirklich fließenden Strom durch seinen quadratischen Mittelwert I_q , der dieselben Verluste hervorbringt wie der wirkliche Strom, so kann man setzen, wenn unter k die

konstanten Verluste verstanden werden:

$$k + I^2 \cdot R = \frac{(k + I_1^2 \cdot R) \cdot t_1 + (k + I_2^2 \cdot R) \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}$$

woraus sich ergibt:

$$I_q = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}} \quad (2)$$

Die Ströme I_1 , I_2 usw. sind die Teilströme, die den verschiedenen Belastungen entsprechen. Die Motorgröße ist dann richtig gewählt, wenn der quadratische Mittelwert des Stromes gleich oder kleiner ist als der Nennstrom des Motors.

Sie wissen, daß

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_A$$

ist. Bei allen Nebenschlußmotoren ist der Fluß Φ nahezu unabhängig von der Belastung, so daß das Drehmoment mit ausreichender Genauigkeit proportional dem Strom ist. Setzt man daher an Stelle der Ströme in Gleichung (2) die Momente ein, so ergibt sich das mittlere quadratische Drehmoment (Bild 11).

$$M_q = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}$$

Bei Motoren mit Reihenschlußverhalten ändert sich der Fluß mit dem Strom I_A . Das bedeutet, daß das Drehmoment mit dem Quadrat des Stromes proportional ist. Somit ergibt sich

$$M_q = \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}$$

Bei konstanter Drehzahl kann man statt der Momente mit den Leistungen rechnen. Es ergibt sich dann die mittlere quadratische Leistung (Bild 12) aus

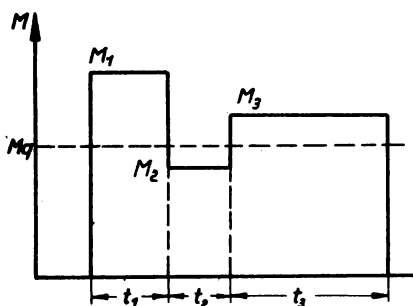


Bild 11

Mittleres quadratisches Drehmoment

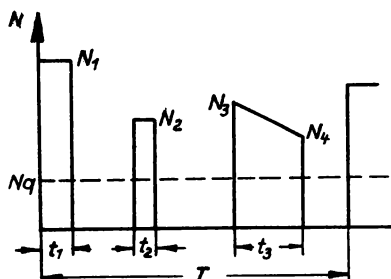


Bild 12

Mittlere quadratische Leistung

$$N_q = \sqrt{\frac{N_1^2 \cdot t_1 + N_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}$$

Bei aussetzendem Betrieb kann diese Gleichung nicht angewandt werden, weil in ihr nicht die Erwärmung beim Anlassen und Bremsen berücksichtigt ist. Die Motorleistung wird dann besser angenähert mit Hilfe des mittleren quadratischen Drehmomentes bestimmt, wobei der Nenner noch um ein Glied von der Größe der halben Arbeitspause zu vergrößern ist.

Die Gleichung lautet dann

$$M_q = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + 0,5 \cdot t_r}}$$

Das Nenndrehmoment bzw. die Nennleistung des zu wählenden Motors muß gleich oder größer als das mittlere quadratische Moment, die mittlere quadratische Leistung sein. Das größte auftretende Gegenmoment bzw. die höchste Leistung muß der Motor natürlich überwinden können.

Lehrbeispiel 4

Die Größe des Motors für eine Förderanlage, die eine Nutzlast

von 4800 kp mit einer Fördergeschwindigkeit von 15 m/s haben soll, ist zu bestimmen. Um das Beschleunigungsmoment zu berücksichtigen, wird die Motorleistung um das 1,4-fache höher gewählt. Der Wirkungsgrad wird zu 85% angenommen.

L ö s u n g :

$$N = \frac{P \cdot v}{\eta \cdot 102} = \frac{4800 \cdot 15}{0,85 \cdot 102} = 830,4 \text{ kW}$$

Mit Rücksicht auf das Beschleunigungsmoment wird

$$N = 830,4 \text{ kW} \cdot 1,4 = 1162,5 \text{ kW};$$

gewählt ein Motor mit

$$N = 1200 \text{ kW}$$

=====

L e h r b e i s p i e l 5

Es ist zu prüfen, ob der im Lehrbeispiel 4 gewählte Motor den Bedingungen der Erwärmung und der Überlastbarkeit genügt, wenn der Durchmesser der Fördertrommel 6 m ist und das gesamte, auf die Motorwelle bezogene Schwungmoment zu 2 378 000 kpm ermittelt wurde. Die Beschleunigung beim Anfahren ist $1,2 \text{ m s}^{-2}$, die Bremsverzögerung $0,75 \text{ m s}^{-2}$, die gesamte Förderhöhe 850 m.

L ö s u n g :

Um M_q zu berechnen, muß bekannt sein:

das Moment beim Anfahren M_1 ,

das Moment während der gleichförmigen Förderung M_2 und

das Moment beim Bremsen M_3 ;

ferner die entsprechenden Zeiten t_1 , t_2 und t_3 .

$$\text{Anfahrzeit: } t_1 = \frac{v}{b_1} = \frac{15 \text{ m} \cdot \text{s}^2}{1,2 \text{ m} \cdot \text{s}} = 12,5 \text{ s}$$

$$\text{Anfahrweg: } h_1 = \frac{v \cdot t_1}{2} = \frac{15 \text{ m} \cdot 12,5 \text{ s}}{2 \cdot \text{s}} = 93,8 \text{ m}$$

$$\text{Bremszeit: } t_3 = \frac{v}{b_3} = \frac{15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}^2}{0,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}} = 20 \text{ s}$$

$$\text{Bremsweg: } h_3 = \frac{v \cdot t_3}{2} = \frac{15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 20 \text{ s}}{2 \cdot \text{s}} = 150 \text{ m}$$

$$\text{Weg bei gleichförmiger Förderung: } h_2 = 850 \text{ m} - (93,8 + 150) \text{ m} = 606,2 \text{ m}$$

$$\text{Zeit des stationären Betriebes: } t_2 = \frac{h_2}{v} = \frac{606,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 40,4 \text{ s}$$

Dynamisches Moment
beim Anfahren:

$$M_A = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot t_1}$$

$$n = \frac{60 \cdot v}{d \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 15}{6 \cdot \pi} = \sim 48 \text{ min}^{-1}$$

$$M_A = \frac{2 \cdot 378 \cdot 000 \cdot 48}{375 \cdot 12,5} = 24 \cdot 350 \text{ kpm}$$

Dynamisches Moment
beim Bremsen:

$$M_B = \frac{2 \cdot 378 \cdot 000 \cdot 48}{375 \cdot 20} = 15 \cdot 220 \text{ kpm}$$

Widerstandsmoment:

$$M_2 = W = \frac{P \cdot d}{\eta \cdot 2} = \frac{4800 \cdot 6}{0,85 \cdot 2} = 16 \cdot 940 \text{ kpm}$$

Motormoment beim An-
fahren:

$$M_1 = W + M_A = (16940 + 24350) \text{ kpm} = 41290 \text{ kpm}$$

Motormoment beim
Bremsen:

$$M_3 = W - M_B = (16940 - 15220) \text{ kpm} = 1720 \text{ kpm}$$

$$M_q = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

$$M_q = \sqrt{\frac{41290^2 \text{ kpm}^2 \cdot 12,5 \text{ s} + 16940^2 \text{ kpm}^2 \cdot 40,4 \text{ s} + 1720^2 \text{ kpm}^2 \cdot 20 \text{ s}}{12,5 \text{ s} + 40,4 \text{ s} + 20 \text{ s}}}$$

$$= 21 \cdot 280 \text{ kpm}$$

Prüfung auf Über-
lastung:

$$\frac{M_{\max}}{M_q} = \frac{41290 \text{ kpm}}{21280 \text{ kpm}} = 1,94 < 2$$

also zulässig.

$$N_q = \frac{M_q \cdot n}{975} = \frac{21280 \cdot 48}{975} = 1048 \text{ kW} < 1200 \text{ kW}$$

Der gewählte Motor ist also ausreichend.

Zusammenfassung

Die auf den Leistungsschildern elektrischer Maschinen angegebenen Nennleistungen gelten für eine Umgebungstemperatur von 40° C. Je niedriger die Umgebungstemperatur oder die Temperatur des Kühlmittels einer elektrischen Maschine ist, um so größer ist ihre Dauerleistung.

Nach VDE 0530 unterscheidet man die Betriebsarten: Dauerbetrieb (DB), kurzzeitiger Betrieb (KB), Dauerbetrieb mit kurzzeitiger Belastung (DKB), aussetzender Betrieb (AB) und Dauerbetrieb mit aussetzender Belastung (DAB). Durchlaufschaltbetrieb (DSB) und Aussetzschaltbetrieb (ASB) sind Sonderfälle des DAB- und AB-Betriebes.

Die relative Einschaltdauer ED ist das Verhältnis zwischen Belastungs- und Spieldauer.

Bleibt bei einem Antrieb die Drehzahl konstant, so spricht man von einem stationären Betrieb. Steigt oder fällt die Drehzahl, dann ist der Betrieb nicht stationär, oder es liegen Übergangszustände vor.

Die Widerstandsmomente der Arbeitsmaschine können konstant sein, sich proportional aber auch quadratisch mit der Drehzahl ändern.

Der Schnittpunkt der Momentenlinien von Motor und Arbeitsmaschine gibt die bei einem Antrieb sich einstellende Drehzahl an.

Bei stabilem Betrieb muß bei Überschreitung der Drehzahl das Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine, bei Unterschreitung derselben das Motordrehmoment überwiegen. Ist das nicht der Fall, dann ist der Betrieb labil.

Das Beschleunigungsmoment ist der Unterschied zwischen Motordrehmoment und Widerstandsmoment der Arbeitsmaschine. Es soll sich nicht stoßweise ändern. Zu großes Beschleunigungsmoment bedeutet harten Anlauf, bei zu kleinem Beschleunigungsmoment werden die Anlaufzeiten zu lang.

Liegt die Anlaufzeit fest, dann kann das Beschleunigungsmoment berechnet werden aus

$$M_{ti} = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot t}$$

Die Motorleistung wird grundsätzlich nach der Gleichung

$$N = \frac{M \cdot n}{975 \cdot \eta}$$

bestimmt. Zur sicheren Überwindung des Gegenmomentes wird ein Motor mit etwas größerer Leistung gewählt, wobei aber eine ausgesprochene Überdimensionierung zu vermeiden ist. Bei größeren Belastungsschwankungen während des Betriebes findet man die Motorleistung mit Hilfe des mittleren quadratischen Drehmomentes oder der mittleren quadratischen Leistung.

Ü b u n g e n

1. Bei einem Motor beträgt die Spieldauer 4 Stunden und die relative Einschaltzeit 40%. Wie groß ist die Einschaltzeit?
2. Worin besteht der Unterschied zwischen KB und AB und zwischen DKB und DAB ?
3. In welchen Fällen wirkt das dynamische Moment bremsend oder treibend?
4. Nennen Sie die bei einem elektromotorischen Antrieb vorkommenden Übergangszustände!
5. Warum kann zum Antrieb einer Drehmaschine kein Motor mit Reihenschlußverhalten verwendet werden?

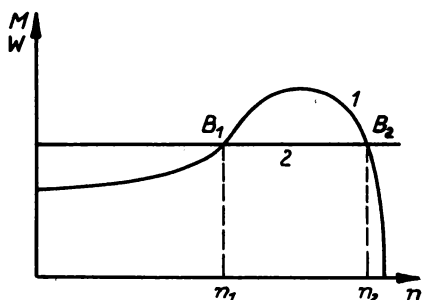


Bild 13

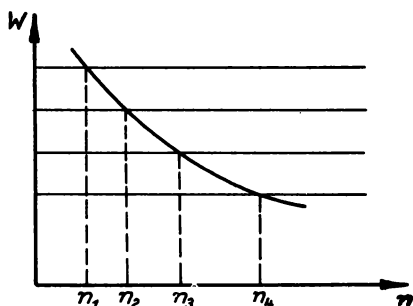


Bild 14

6. In Bild 13 stellt die Kurve 1 die Drehmomentenlinie eines Asynchronmotors dar, der eine Arbeitsmaschine, deren Widerstandsmoment konstant ist (Kurve 2) antreibt. Bei welchem der beiden Betriebspunkte B_1 und B_2 ist stabiler Betrieb vorhanden? Wie würde sich eine geringe Drehzahlerhöhung, wie eine geringe Drehzahlverminderung beim labilen Betriebspunkt auswirken?
7. Bei einem Antrieb sind die Betriebspunkte der Arbeitsmaschine durch die in Bild 14 dargestellte Charakteristik gegeben. Welche Eigenschaften müssen die Motoren für diesen Zweck haben?
8. Ein sechspoliger Drehstrommotor hat eine Leistung von 11 kW und einen Schlupf von 0,04%. Sein Schwungmoment ist $1,5 \text{ kpm}^2$. Er treibt eine Arbeitsmaschine an, deren Drehzahl $n = 250 \text{ min}^{-1}$ und deren Schwungmoment mit 300 kpm^2 ermittelt wurden. Wie groß ist die Anlaufzeit?
9. Ein Antrieb wird in 2 s auf seine Nenndrehzahl gebracht, wobei eine Anlaufleistung von 44,3 kW ermittelt wurde. Bei Beginn der gleichförmigen Bewegung, die 10 s anhält, fällt die Motorleistung auf 39,2 kW ab. Die Bremsleistung ist bei Beginn des Bremsens, das 1 s dauert, 30,5 kW. Welche Motorgröße ist für diesen Antrieb zu wählen?

5. Tariffragen

5.1 Tarife

Die Erzeugungs- oder Gestehungskosten elektrischer Energie setzen sich aus 2 Teilen zusammen, nämlich

1. den festen Kosten und
2. den veränderlichen Kosten.

Die Kosten, die bei einem Kraftwerk immer in gleicher Höhe auftreten, unabhängig davon, ob das Kraftwerk voll belastet ist oder still steht, sind die festen Kosten. Zu ihnen gehören z.B. die Kosten für die Errichtung und Unterhaltung der elektrischen Anlagen, Steuern usw. Die veränderlichen Kosten bestehen unter anderem aus den Kosten für Brennstoffe, Schmieröle, Löhne und Gehälter usw.

Die Gesamtkosten müssen von den Verbrauchern elektrischer Energie gedeckt werden. Daher legt man die Gestehungskosten auf die Verbraucher um, wobei man ähnlich wie bei den Gestehungskosten einen festen und einen veränderlichen Teil unterscheidet. Der feste Bestandteil ist der Leistungs- oder Grundpreis, der sich nach dem Umfang der Verbrauchieranlage richtet. Der veränderliche Teil ist der Arbeitspreis. Das ist der Preis, der nach einem vereinbarten Satz für die bezogene elektrische Arbeit zu zahlen ist.

In der Deutschen Demokratischen Republik sind die Tarife durch die Preisverordnung 281 (GBl. 182/31.12.1952) gesetzlich festgelegt.

Man unterscheidet die in Tafel 1 aufgeführten Tarife. Neben dem Haushalttarif besteht noch als Ausnahme der "Kleinstabnehmertarif". Bei ihm gibt es keinen Grundpreis; es wird nur der Arbeitspreis - 0,40 DM je kWh - berechnet. Der "Pauschal-tarif" wird kaum noch angewendet.

Bei dem Sondertarif, dem früheren Großabnehmertarif, wird der Grundpreis, wie Sie aus Tafel 1 ansehen können, nach der in

Anspruch genommenen Scheinleistung festgelegt. Damit will man erreichen, daß der Verbraucher seinen Blindleistungsverbrauch möglichst klein hält. Überlegen Sie, warum das erforderlich ist!

T a f e l 1 : Tarife		
	Grundpreis	Arbeitspreis je kWh
Haushaltstarif	0,50 DM je Wohnraum und Monat	0,08 DM
Lichtanl. Gewerbetarif Kraftanl.	0,50 DM je 50 W in- stall. Leistung 1,50 DM je 100 W install. Leistung	0,08 DM
Landwirtschaftstarif	entspr. der Größe der bewirtschafteten Fläche	0,08 DM
Sondertarife bei install. Leistung vor 30 kVA oder jährl. Mindestabnahme von 50 000 kWh	7,50 DM je kVA im Monat	0,02 DM

Welchen Einfluß der Leistungsfaktor auf die Preisgestaltung hat, soll Ihnen das folgende Beispiel zeigen:

Wie groß ist der Grundpreis im Monat für einen Betrieb, der eine maximale Wirkleistung von 1000 kW entnimmt, bei

a) $\cos \varphi = 1$; b) $\cos \varphi = 0,8$; c) $\cos \varphi = 0,5$?

L ö s u n g :

a) $\cos \varphi = 1$

$$N_s = N_w = 1000 \text{ kW}$$

$$\text{Grundpreis: } 7,50 \text{ DM} \cdot 1000 = \underline{\underline{7500,-- \text{ DM}}}$$

b) $\cos \varphi = 0,8$

$$N_s = \frac{N_w}{\cos \varphi} = \frac{1000 \text{ kW}}{0,8} = 1250 \text{ kVA}$$

$$\text{Grundpreis: } 7,50 \text{ DM} \cdot 1250 = \underline{\underline{9375,-- \text{ DM}}}$$

$$c) \cos \varphi = 0,5 \quad N_s = \frac{N_w}{\cos \varphi} = \frac{1000 \text{ kW}}{0,5} = 2000 \text{ kVA}$$

$$\text{Grundpreis: } 7,50 \text{ DM} \cdot 2000 = \underline{\underline{15\,000,-- \text{ DM}}}$$

5.2 Maßnahmen zur Verbesserung des $\cos \varphi$

Bei einer konstanten Wirkleistung wird, wie Ihnen bekannt ist, durch einen schlechten $\cos \varphi$ die Blindleistung erhöht und der Gesamtstrom größer. Die Erhöhung der Stromstärke erfordert größere Schaltgeräte, Sicherungen, Meßinstrumente, Schutzeinrichtungen usw. Dadurch wird die Anlage komplizierter und teurer. Der schlechte Leistungsfaktor verhindert also die volle Ausnutzung der installierten Krafteinrichtungen. Daher soll durch den Tarif, wie es das Beispiel in 5.1 zeigt, der Abnehmer veranlaßt werden, für eine rationelle Ausnutzung seiner elektrischen Anlage zu sorgen, d.h. einem zu kleinen $\cos \varphi$ vorzubeugen. Welche Maßnahmen können ergriffen werden, den $\cos \varphi$ zu verbessern? Sie wissen, daß hierzu ein übererregter Synchronmotor verwandt werden kann, weil er einen voreilenden Blindstrom erzeugt. Auch der Kondensator erzeugt einen voreilenden Blindstrom. Gegenüber dem Synchronmotor hat er den Vorteil, daß er keiner Synchronisation bedarf, keine umlaufenden Teile hat und weniger Platz erfordert. Daher finden Kondensatoren als "ruhende Phasenschieber" ausgedehnte Anwendung zur Verbesserung des $\cos \varphi$. Wie man die zur Verbesserung des Leistungsfaktors benötigte Scheinleistung ermittelt, sollen Ihnen die folgenden Lehrbeispiele zeigen.

L e h r b e i s p i e l 6

Aus einem Drehstromnetz benötigt ein Betrieb 500 kW. Infolge sehr hoher induktiver Belastung ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,4$. Wie groß sind die dem Netz entnommene Schein- und Blindleistung?

L ö s u n g :

$$N_s = \frac{N_w}{\cos \varphi} = \frac{500 \text{ kW}}{0,4} = \underline{\underline{1250 \text{ kVA}}}$$

$$N_{Bl} = \sqrt{N_s^2 - N_w^2} = N_s \cdot \sin$$

$$= \sqrt{1250^2 - 500^2} = 1250 \cdot 0,92 = 1150 \text{ kVar (reaktiv)}$$

L e h r b e i s p i e l 7

Wie groß wird der Gesamt-Leistungsfaktor $\cos \varphi$, wenn von den 500 kW Drehstromleistung des Lehrbeispiels 6 etwa 170 kW als Lichtstrom mit $\cos \varphi = 1$ fließen ?

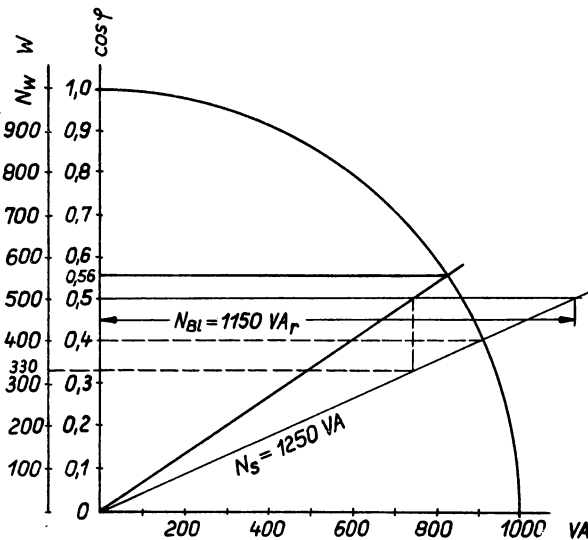


Bild 15

Zeigerdiagramm für Lehrbeispiel 7

L ö s u n g :

Aus dem Diagramm (Bild 15) ergibt sich:

$$N_{Bl} = \sim 760 \text{ kVar}$$

$$\tan \varphi = \frac{760}{500} = 1,52 \quad \cos \varphi = \underline{\underline{0,56}}$$

Zur einfachen und schnellen Bestimmung der Schein- bzw. Blindleistungen oder des $\cos \varphi$ dient das in Bild 16 dargestellte Diagramm.

Für Lehrbeispiel 7 ergibt sich aus ihm:

bei $(500 - 170) \text{ kW} = 330 \text{ kW}$ und $\cos \varphi = 0,4$ $N_s = 820 \text{ kVA}$
von hier senkrecht nach oben, Endpunkt mit Nullpunkt verbinden. Sie lesen ab: $\cos \varphi = 0,56$.

Aus demselben Diagramm kann man bei der $\cos \varphi$ -Verbesserung gleich die Größe des erforderlichen Phasenschiebers (Kondensator oder Synchronmotor) bestimmen.

L e h r b e i s p i e l 8

Wieviel kVar müßte eine Kondensatorbatterie abgeben, um den Leistungsfaktor aus Lehrbeispiel 7 von $\cos \varphi = 0,56$ auf $\cos \varphi = 0,8$ zu bringen, und für welche Scheinleistung wäre sie zu bestellen?

L ö s u n g :

Bei $\cos \varphi = 0,56$ wird abgelesen: $N_s = 900 \text{ kVA}$
 $N_{Bl} = 750 \text{ kVar}.$

Die Kondensatorbatterie muß eine voreilende Blindleistung hervorbringen, d.h. eine der bisherigen Magnetisierungsleistung entgegengesetzte Leistung, die so groß ist, daß der $\cos \varphi = 0,8$ wird. Sie lesen diese Leistung ab zu

$$N_{Bl} = 370 \text{ kVar}.$$

Die Kondensatorbatterie muß also für eine Scheinleistung von
 $N_s = 630 \text{ kVA}$
bestellt werden.

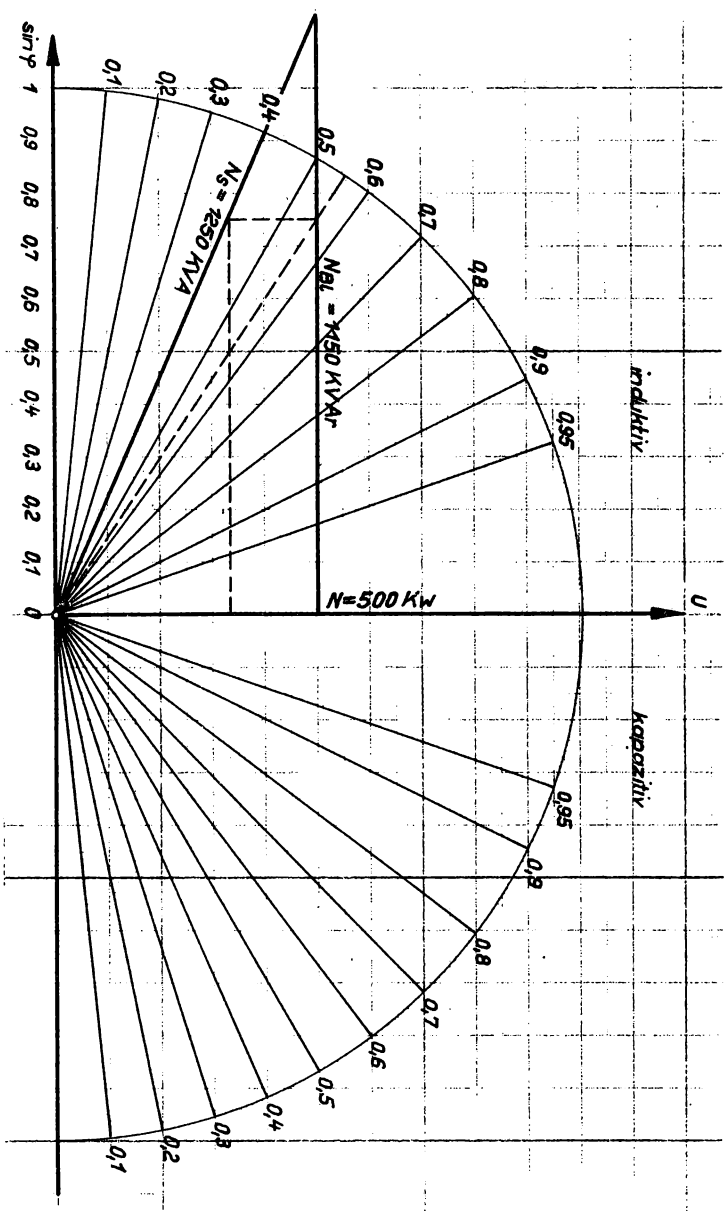


Bild 16

Tafel zur vektoriellen Ermittlung von Schein-, Wirk- und Blindleistungen
bzw. Strömen

Zusammenfassung

Die Tarife für den Bezug elektrischer Arbeit setzen sich aus dem Grundpreis und dem Arbeitspreis zusammen.

Man unterscheidet: Haushalt-, Gewerbe-, Landwirtschafts- und Sondertarife.

Bei den Sondertarifen liegt der Berechnung des Grundpreises die Scheinleistung zugrunde.

Zur wirtschaftlichen Ausnutzung der Anlage und zur Kleinhaltung des Grundpreises muß der Leistungsfaktor groß sein. Das erreicht man durch Zuschalten von Kondensatoren oder Synchronmotoren.

Ü b u n g

10. Ein Betrieb entnimmt einem Drehstromnetz 300 kW bei $\cos \varphi = 0,7$ und einer Netzspannung von 6000 V. Die Neuaufstellung weiterer Arbeitsmaschinen erfordert eine zusätzliche Leistung von 160 kW. Hierfür soll ein Synchronmotor aufgestellt werden, dessen Wirkungsgrad zu 90% angenommen wird. Der Leistungsfaktor des Netzes soll durch ihn gleichzeitig auf 0,85 verbessert werden. Welche Scheinleistung muß der Motor haben?

6. Schaltgeräte für Niederspannungsanlagen

Zum Anschluß der Motoren sind ein Netzschalter und Sicherungen oder Schütze unbedingt erforderlich.

6.1 Schütze

Ein Schütz ist ein elektromagnetischer Schalter, mit dem es möglich ist, durch kleine Steuerströme entfernt liegende Stromkreise zu öffnen oder zu schließen. Bild 17 zeigt Ihnen

die grundsätzliche Wirkungsweise eines Schützes. Beim Schließen des Steuerstromkreises wird der Schaltebel vom Elektromagneten angezogen und schließt über den Kontakt K den gesteuerten Stromkreis. Bei Unterbrechung des Steuerstromkreises wird durch die Feder der Schaltebel vom Elektromagneten gerissen, d.h. der gesteuerte Stromkreis wird geöffnet.

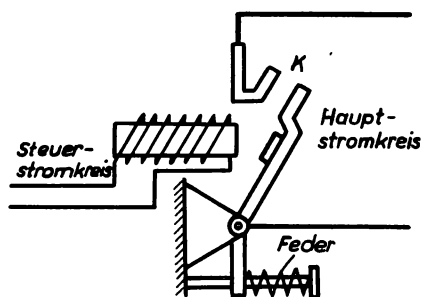


Bild 17
Prinzip eines Schützes

Schütze werden meist durch Druckknopfschalter betätigt. Bild 18 zeigt Ihnen das Schaltbild eines Drehstromschützes.

Der Haltekontakt H bewirkt, daß auch nach Loslassen des Ein-Druckknopfes das Schütz eingeschaltet bleibt. Der Steuerstromkreis ist dann nicht mehr über den Ein-Druckknopf, sondern über den Haltekontakt geschlossen. Der Steuerstromkreis wird erst unterbrochen und damit das Schütz zum Abfallen gebracht, wenn der Aus-Druckknopf betätigt wird.

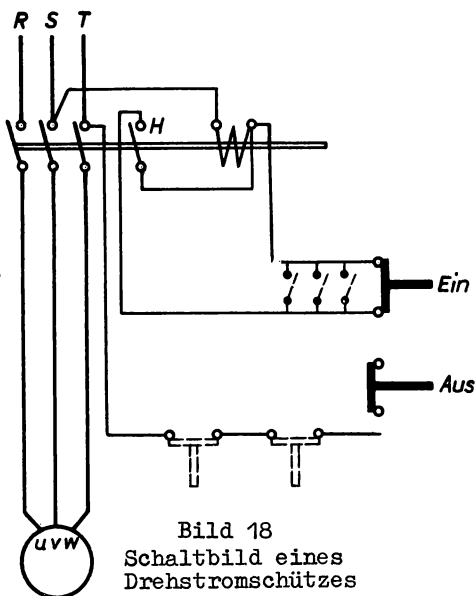


Bild 18
Schaltbild eines Drehstromschützes

Parallel zum Ein-Druckknopf können weitere

Druckschalter gelegt werden, so daß von den verschiedensten Stellen aus der Motor ans Netz gelegt werden kann. Ebenso ist es möglich, in die Leitung vom Aus-Druckknopf andere Aus-Schalter zu legen. Hilfsschalter HS, die gleichzeitig mit dem Schal-

ter betätigt werden, lassen Verriegelungen mit anderen Schaltgeräten zu oder steuern andere Schaltgeräte. So ist es möglich, mit Hilfe der Schütze die Schaltvorgänge durch Verwendung von Druckschaltern, Schwimmerschaltern, Kontaktthermostaten, Kontaktmanometern, Kühlwasserkontrollschaltern, Thermostaten, Zeitrelais, Kontaktwerke usw. weitgehend zu automatisieren.

Bild 19 zeigt das Schaltbild eines Drehstrom-Wendesches. Werden Sie sich an Hand des Schaltbildes über die Wirkungsweise klar!

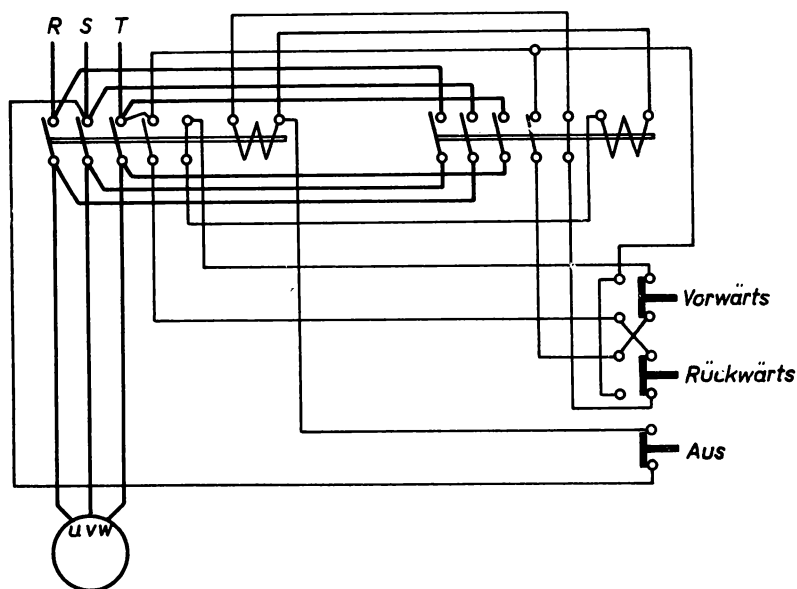


Bild 19
Drehstrom-Wendeschutz (Schaltbild)

Die Schütze sind meist noch mit einem thermischen Relais ausgerüstet, das als Bimetall- oder Schmelzlotrelais ausgeführt ist. Infolge seiner Wärmeträgheit unterbricht der Bimetall-Auslöser nicht kurzzeitig auftretende Überströme. Er wirkt erst dann, wenn die Überlastung längere Zeit anhält. Den langsamen Erwärmungen der Leitungen und Motoren können die Bi-

metallauslöser gut angepaßt werden. Man unterscheidet Luft- und Ölschütze. Am meisten verwendet man Luftschütze (Bild 20), weil nicht nur ihr Einbau und ihre Wartung einfacher sind, sondern weil sie auch eine viel größere Schalthäufigkeit als Ölschütze, bei denen sich die Schaltteile in einem mit Öl gefüllten Gefäß befinden, gestatten. Ölschütze werden hauptsächlich in Betrieben verwandt, in denen die zu schaltenden Teile durch staubige oder feuchte Luft und durch chemische Einflüsse gefährdet sind.

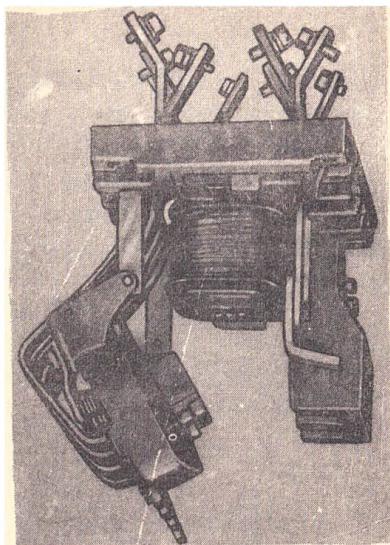


Bild 20
Dreipoliges Schütz

6.2 Schutzschalter

Während die Sicherungen dem Leitungsschutz dienen, übernehmen die Schutzschalter außerdem noch den Schutz der angeschlossenen Maschinen und Apparate gegen Überlastung. Alle Schutzschalter sind Selbstausschalter. Man unterscheidet: Überstrom-, Unterspannungs- und Rückstromschalter bzw. Kombinationen dieser Schalter, von denen der Motorschutzschalter der bekannteste ist.

6.2.1 Überstromschalter

Das Prinzip des Überstromschalters, früher auch Maximalstromselbstschalter oder Maximalautomat genannt, erkennen Sie aus Bild 21. Beim Einschalten gelangt durch die Klinke K das Schaltmesser in die Einschaltstellung. Gleichzeitig damit spannt sich die Feder des Schaltmessers. Ist der Strom zu groß, dann wird durch die Spule S der Anker des Elektromagneten angezogen. Dadurch löst sich die Verklüftung, das Schaltmesser wird durch die Feder aus dem Messerkontakt gerissen, der Stromkreis somit unterbrochen. Damit kurzzeitig

auftretende Überströme, wie sie z.B. beim Einschalten von Kurzschlußläufermotoren auftreten, den Schalter nicht auslösen, wird häufig durch den Elektromagneten ein mechanisches Auslösewerk in Gang gesetzt, dessen Ablaufzeit eingestellt werden kann. Wenn der Strom während der Ablaufzeit nicht wieder auf seinen Nennwert absinkt, öffnet sich der Schalter.

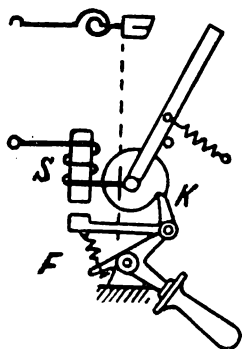


Bild 21

Nach dem selbsttätigen Auslösen des Schalters bleibt der Handhebel in der Ein-Stellung. Zur Wiedereinschaltung muß, damit die Verklüpfung wieder einrastet, der Handhebel zunächst in die Aus-Stellung zurückgeführt werden. Bei Handauslösung, d.h. also beim Ausschalten des Überstromschalters durch Betätigung des Handhebels, drückt die Feder F den Anker gegen die Magnetspule S, wodurch der oben beschriebene Auslösevorgang, den man Freiauslösung nennt, eingeleitet wird. Sie erkennen, daß die Ausschaltgeschwindigkeit unabhängig von der Schaltgeschwindigkeit des Handhebels erfolgt, und daß auch, trotz Festhalten des Handhebels, die Auslösung bei Überstrom geschieht. Weil die Schalter gekapselt oder hinter der Schalttafel angebracht sind und infolge der Freiauslösung der tatsächliche Schaltzustand nicht ohne weiteres erkannt werden kann, benutzt man Signallampen oder andere geeignete Geräte zur Anzeige der Schalterstellung.

Sollen die Überstromschalter auch dem Überlastungsschutz dienen, so müssen sie noch mit einer thermischen Auslösung versehen sein.

Gegenüber den Sicherungen, die im Störfall die Leitung nur einpolig unterbrechen, schalten die Überstromschalter allpolig ab. Sie sind jederzeit wieder einschaltbereit und lassen sich den jeweiligen Betriebsverhältnissen sehr gut anpassen.

6.2.2 Unterspannungsschalter

Diese Schalter, die auch Spannungsrückgangs- oder Nullspannungsschalter genannt werden, schalten die Anlage beim Ausbleiben der Netzspannung oder bei einer 60 ... 70prozentigen Spannungsminderung allpolig ab. Statt der Stromspule besitzen sie eine Spannungsspule.

Reine Nullspannungsschalter werden selten verwendet. Meist sind die Unterspannungsschalter Überstromschalter, die mit einer Nullspannungsspule ausgerüstet sind. Nach Wiederkehr der Netzspannung, nachdem die angeschlossenen Verbraucher, vor allem die Schalter und Anlaßgeräte, in ihre Aus-Stellung gebracht worden sind, müssen im allgemeinen die Schalter wieder von Hand eingeschaltet werden.

6.2.3 Rückstromschalter

Sie kommen nur bei Gleichstrom in Frage und dienen dazu, bei Stromumkehr den Gleichstromkreis zu unterbrechen. Dadurch wird verhütet, daß Spannungserzeuger und Spannungsverbraucher durch Stromumkehr gefährdet werden.

6.2.4 Motorschutzschalter

Die Motorschutzschalter dienen außer zur Schaltung eines elektrischen Antriebes zu seiner Überwachung und dem Schutz gegen Überlastung und Einphasenlauf.

Motorschutzschalter können 3 oder 4 Auslöser enthalten. Die elektromagnetische Auslösung, die als Kurzschlußschutz dient, schaltet bei 15fachem Überstrom unverzüglich ab. Die thermischen Auslöser dienen als Überlastungsschutz. Nach VDE 0665 sollen die Auslöser so beschaffen sein, daß sie bei 20 % Überlast über den Nennstrom innerhalb 2 Stunden, bei 50 % Überlast innerhalb 2 Minuten auslösen, während bei 5 % Überlast eine Auslösung innerhalb 2 Stunden nicht erfolgen darf. Im allgemeinen enthalten die Motorschutzschalter diese beiden

Auslöser. Vielfach

sind die Motorschutzschalter noch mit einer Nullspannungsauslösung versehen, die dem Unterspannungsschutz dient. Bei Kurzschlußläufern können dann solche Schalter auch zur Fernschaltung benutzt werden, wie es Bild 22 zeigt. Wie Sie bei der Behandlung der Schutzschaltung noch kennenlernen, besitzen die Motorschutzschalter meist noch eine Fehlerspannungsauslösung, die Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung gibt.

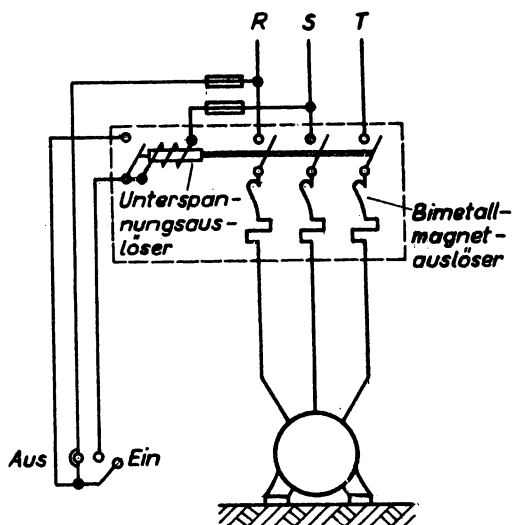


Bild 22
Motorschutzschalter

Zusammenfassung

=====

Schütze sind elektromagnetische Schalter. Sie gestatten, mit kleinen Hilfsströmen große Leistungen zu schalten. Es gibt luft- und ölgekühlte Schütze.

Schutzschalter sind Selbstausschalter. Sie dienen als Leitungsschutz gegen Überströme und als Überlastungsschutz der angeschlossenen Maschinen und Geräte. Alle Schutzschalter haben Freiauslösung.

Die wichtigsten Schutzschalter sind: Überstrom-, Unterspannungs-, Rückstrom- und Motorschutzschalter.

Die thermischen oder Wärmeauslöser dienen als Überlastungsschutz, die elektromagnetischen oder Schnellauslöser sprechen bei Kurzschluß an und die Unterspannungsauslöser beim Ausbleiben der Spannung oder einem 60 ... 70prozentigen Absinken

derselben.

Ü b u n g e n

11. Erläutern Sie die grundsätzliche Wirkungsweise eines Schützes!
12. Welche Vorteile hat ein Schutzschalter gegenüber der Sicherung?
13. Warum verwendet man Unterspannungsauslöser?
14. Wie muß ein Schutzschalter beschaffen sein, wenn er zur Fernauslösung benutzt werden soll?

7. Schutzmaßnahmen in Niederspannungsanlagen

7.1 Allgemeines

Sie wissen, daß der elektrische Strom vom Körper der Menschen und Tiere verhältnismäßig gut geleitet wird und beim Menschen eine Stromstärke von 0,05 ... 0,1 A schon tödlich wirken kann. Um Unfälle durch den elektrischen Strom zu verhüten, müssen daher die Vorschriften und Regeln des VDE strengstens beachtet und der Betriebszustand der elektrischen Anlagen gewissenhaft überwacht und immer in einem ordnungsgemäßen Zustand erhalten werden.

Bei der Behandlung der Schutzarten elektrischer Maschinen wurde schon auf den Berührungsschutz hingewiesen. Im VDE 0100, § 3, heißt es:

- a) Die unter Spannung stehenden, nicht mit Isolierstoff bedeckten Teile müssen im Handbereich gegen zufällige Berührung geschützt sein (Ausnahmen sind gestattet bei Schweißanlagen, Glüh- und Schmelzöfen und dergleichen). Lackierung oder Emaillierung gilt nicht als Isolierung im Sinne des Berührungsschutzes.

- b) Abdeckungen, Schutzgitter und dergleichen müssen mechanisch widerstandsfähig sein und zuverlässig befestigt werden. Im Handbereich müssen die Schutzverkleidungen der Leitungen in die Maschinen und Geräte eingeführt werden.

Die Einhaltung dieser Bestimmungen verhindert die zufällige Berührung stromführender Teile. Durch Schadhafwerden der Isolation kann aber ein Stromübergang auf normalerweise nicht stromführende, berührbare, metallische Konstruktionsteile, z.B. auf die Gehäuse elektrischer Maschinen und Geräte, erfolgen und Unfälle hervorrufen. Deshalb sind noch Schutzmaßnahmen gegen Berührungsspannungen erforderlich.

Im § 3 der Vorschriften heißt es weiter:

- c) Berührungsspannung im Sinne der folgenden Regeln tritt auf, wenn durch Schäden der elektrischen Anlage oder andere Unregelmäßigkeiten die der Berührung zugänglichen metallischen Teile der elektrischen Einrichtungen eine "Spannung gegen Erde" annehmen. Dieses zu verhindern, ist in erster Linie Aufgabe des Baues der elektrischen Apparate und Gebrauchsgegenstände sowie sorgfältiger Montage.

1. Darüber hinausgehende Schutzmaßnahmen sind ihrer Natur nach als Behelf anzusehen. Sie sollen aber Anwendung finden, wenn die Möglichkeit einer besonderen Gefährdung vorliegt, z.B. in Räumen, in denen der Übergangswiderstand des Menschen zur Erde durch Feuchtigkeit, Wärme, chemische Einflüsse oder andere Ursachen wesentlich herabgesetzt ist.

- d) Bei Spannungen von mehr als 250 V gegen Erde sind Schutzmaßnahmen nach Regel 1 überall anzuwenden.

Beachten Sie, daß hiernach alle über den einwandfreien Bau der Maschinen und Geräte hinausgehenden Schutzmaßnahmen eine Behelfsmaßnahme darstellen, die aber auszuführen zwingend ist.

2. Als Schutzmaßnahmen kommen in Betracht: Isolierung, Kleinspannung, Erdung, Nullung und Schutzschaltung.

Durch diese Schutzmaßnahmen soll erreicht werden, daß die Überbrückung einer bedenklichen Berührungsspannung durch einen Menschen entweder verhindert wird (Isolierung), oder daß eine bedenkliche Berührungsspannung überhaupt unmöglich ist (Transformation oder Umspannung auf Kleinspannung), oder daß bei bedenklicher Berührungsspannung die Fehlerstelle selbständig von der Stromquelle abgetrennt wird (z.B. Erdung, Nullung, Schutzschaltung).

7.2 Isolierung

Durch Isolierung soll die Berührung zugänglicher, betriebsmäßig nicht stromführender Teile unmöglich gemacht werden. Das kann man erreichen, indem man diese Teile mit Isolierstoff umpreßt (z.B. isolierende Umpressung von Schaltergriffen, Handrädern usw.) oder durch eine Isolierung des Menschen gegen Erde (z.B. durch isolierenden Fußbodenbelag, trockene Holzböden, isolierende Wände).

Voraussetzung für eine zuverlässige Isolierung ist ein durch Beanspruchung und Alterung unbeeinflussbares Isoliermaterial. Sicherlich haben Sie schon einmal Leitungsschnüre in Händen gehabt, bei denen die Gummiisolierung brüchig geworden ist. Schon hieraus erkennen Sie, daß eine allen Ansprüchen gerecht werdende Isolierung noch nicht vorhanden ist. Wärme, Feuchtigkeit, Schmutz und mangelnde Pflege beeinflussen die Isolierung in hohem Maße.

Eine Isolierung durch Holzfußböden oder isolierenden Fußbodenbelag ist nicht ausreichend, um Unfällen vorzubeugen. Besonders ist das dann nicht der Fall, wenn sich im Handbereich, d.h. im Abstand von 2,5 m von der elektrischen Leitung Wasserleitungen oder Heizkörper befinden. In solchen Fällen sind noch besondere Schutzmaßnahmen vorzusehen, wie z.B. die Ihnen bekannten und in 7.5 näher beschriebenen Schukodosen (Schutzkontaktdosen).

7.3 Kleinspannung

Der Schutz durch Isolierung genügt nicht, wenn Arbeiten unter beengten Verhältnissen auszuführen sind und die Möglichkeit einer großflächigen Berührung metallener, also gut leitender Werkstoffe, besteht. Das ist z.B. der Fall bei Arbeiten in Kesseln, Behältern, Rohrkanälen usw. Hier müssen die Leuchten und alle anderen elektrischen Arbeitsgeräte an Kleinspannung angeschlossen werden.

Unter Kleinspannung versteht man Spannungen bis zu 42 V. Bei Gleichstrom kann sie mit Akkumulatorenbatterien oder Motorumformern, bei Wechselstrom durch Transformatoren mit getrennten Wicklungen erzeugt werden. Genormte Kleinspannungen sind 24 V und 42 V.

Obwohl es sich um Kleinspannung handelt, müssen - den Vorschriften entsprechend - alle Leitungen und Geräte genauso wie solche für eine Betriebsspannung von 250 V isoliert sein. Es dürfen weiterhin zur Vermeidung von Irrtümern alle Stecker und Steckdosen für Kleinspannung nicht mit denen für die Betriebsspannung verwechselbar sein. Das wird durch Kontakte erreicht, die vom normalen Abstand abweichend angeordnet sind.

Für Kinderspielzeug sind 24 V Kleinspannung vorgeschrieben. Kleinspannung durch Vorschalten von Glühlampen oder einem Vorschaltwiderstand herbeizuführen, bedeutet Lebensgefahr und ist daher verboten.

7.4 Erdung

Erden nennt man das Herstellen einer gut leitenden Verbindung eines Anlagenteiles mit dem Erdpotential, das als Null vorausgesetzt wird. Gute Erdung wird erreicht durch besondere Erder, die möglichst in gut leitendes Erdreich - das ist solches, das sich in der Nähe des Grundwasserspiegels befindet - eingebettet werden. Als Erder verwendet man Plattenerder, Rohrerder und Oberflächenerder.

Plattenerder sind verzinkte Stahlblechplatten von mindestens $0,5 \text{ m}^2$ Fläche. Rohrerder sind verzinkte Stahlrohre, die so tief in den Erdboden zu treiben sind, daß der Übergangswiderstand zur Erde möglichst klein ist. Unter einem Oberflächen-erder, der auch als Bänderder bezeichnet wird, versteht man verzinkte Eisenbänder, die auf größere Entfernung strahlenförmig von einem Mittelpunkt aus in geringer Tiefe in die Erde verlegt werden.

Nach VDE 0141 unterscheidet man Betriebserdung und Schutz-erdung.

Die Betriebserdung ist für das betriebsmäßige Arbeiten von elektrischen Anlagen und Geräten notwendig. Zu ihr gehört z.B. die Erdung des Sternpunktes in Drehstrom-Vierleiteranlagen, des Mittelpunktleiters bei Gleichstrom oder die Erdung eines Poles bei Bahnanlagen. Die Erdleitung führt in allen diesen Fällen - auch bei ungestörtem Betrieb - Strom.

Die Betriebserde ist keine Schutzmaßnahme; deshalb ist in einer Anlage eine Schutz-erde zusätzlich notwendig.

Bei der Schutz-erdung gehört die Erdleitung nicht zum Betriebsstromkreis. Sie dient vielmehr dazu, den Menschen bei Berührung oder beim Umfassen metallischer Konstruktionsteile der elektrischen Anlagen vor zu hoher Berührungsspannung zu schützen. Sie führt - im Gegensatz zur Betriebserdung - nur bei Körperschluß, also im gestörten Zustand der Anlage, Strom.

Wie Sie aus Bild 23 ersehen können, kann zwischen dem Gehäuseteil des Motors und der Erde niemals eine gefährliche Spannung auftreten. Es ist somit auch der Mensch, der das Gehäuse berührt, nicht gefährdet. Voraussetzung ist allerdings, daß der Erdübergangswiderstand des Erders klein ist. Bei der Schutz-erdung werden die besten Erdungen durch Verbindung mit ausgedehnten Wasserrohrnetzen erreicht. Der Anschluß der Erdleitung muß hierbei - von der Wasserrohrnetzseite aus gesehen - vor dem Wasserzähler erfolgen. Wird die Erdleitung hinter ihm angeschlossen, muß der Wasserzähler überbrückt werden. Warum ist das nötig?

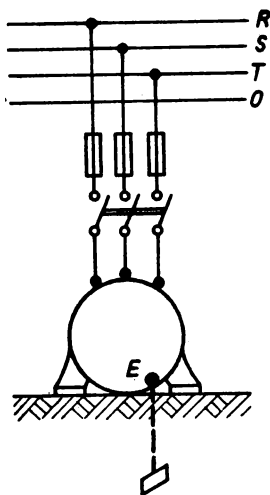


Bild 23
Schutz-erdung

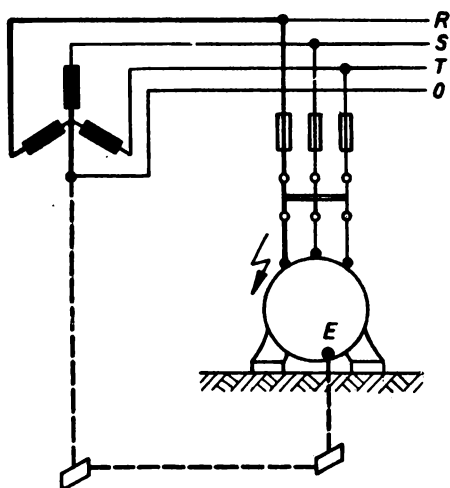


Bild 24
Fehlerstromkreis bei der
Schutz-erdung

In den Vorschriften ist niedergelegt, daß bei Erdungen in Anlagen mit Betriebserde der durch einen Körperschluß auftretende Fehlerstrom die Sicherung der geerdeten Maschine oder des geerdeten Gerätes zum Auslösen bringen muß. Das bewirkt aber nur ein Strom, dessen Stärke das 2,5-fache der Nennstromstärke der Sicherung ist. Der in Bild 24 skizzierte Motor sei mit 20 A abgesichert. Die Abschaltstromstärke der Sicherung ist also

$$I_A = 2,5 \cdot I_N = 2,5 \cdot 20 \text{ A} = 50 \text{ A}.$$

Hat nun z.B. der Strang R Körperschluß, dann ist der stark gezeichnete Fehlerstromkreis vorhanden. Unter der Annahme, daß der Erdwiderstand der Betriebserdung gleich dem der Schutz-erdung ist, ergibt sich ein Erdungswiderstand von

$$R_E = \frac{U_{ph}}{2 \cdot I_A} = \frac{220 \text{ V}}{2 \cdot 50 \text{ A}} = 2,2 \, \Omega$$

Bei einem größeren Erdungswiderstand würde die Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung nicht zur Wirkung kommen. Bei nicht betriebsmäßig geerdeten Netzen darf die Berührungsspan-

nung 65 V nicht überschreiten. Es ergibt sich dann für den Erdübergangswiderstand

$$R_E = \frac{65 \text{ V}}{I_A}$$

Für das angeführte Beispiel müßte also in diesem Falle sein:

$$R_E = \frac{65}{50} = 1,3 \Omega$$

7.5 Nullung

Wie Sie selbst erkennen, müssen die Erdübergangswiderstände, die die Schutzerdung erfordert, besonders bei Maschinen und Geräten, die hohe Stromstärken benötigen, sehr klein sein. Solche kleine Erdübergangswiderstände sind schwer zu erreichen. Daher hat man versucht, den Berührungsschutz durch solche Mittel herbeizuführen, die größere Erdübergangswiderstände zulassen. Eines dieser Mittel ist die Nullung.

Unter Nullung oder Nullen versteht man die Herstellung einer gut leitenden Verbindung des zu schützenden Teiles mit dem betriebsmäßig geerdeten Mittelpunktsleiter, der teilweise auch als Nulleiter bezeichnet wird. (Daher der Name Nullung). Die Nullung kann also nur in Gleichstromnetzen mit Mittelpunktsleiter oder in Drehstromnetzen mit Mittelpunktsleiter angewendet werden.

Wie Sie aus Bild 25 erkennen, entsteht bei einem Körperschluß ein Kurzschluß zwischen dem betreffenden Strang und dem Mittelpunktsleiter. Auch hier muß die Höhe des auftretenden Kurzschlußstromes, wenn er zum Durchbrennen der Sicherung oder zum Auslösen des Selbstschalters führen soll, das

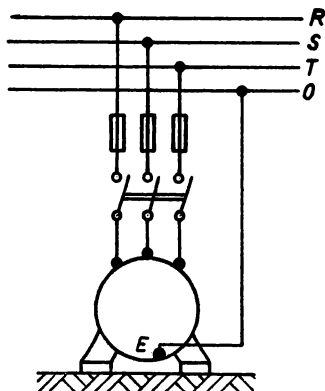


Bild 25
Nullung

2,5-fache des Nennstromes der vorgeschalteten Sicherung betragen. Die Nullungsleitung muß daher so bemessen sein, daß in ihr dieser Strom kurzzeitig fließen kann, ohne sie übermäßig zu erwärmen.

Der Schutz durch Nullung würde unwirksam sein, wenn der Mittelpunktsteiter oder die Nullungsleitung an irgendeiner Stelle unterbrochen wäre, wie Bild 26 zeigt.

Damit aber der Schutz - auch bei evtl. Mittelpunktsteiterbruch - aufrecht erhalten bleibt, werden besonders gute Erder, wie z.B. Wasserrohrleitungen in Bereich des Stromverteilungsnetzes, mit dem Mittelpunktsteiter verbunden (Bild 27).

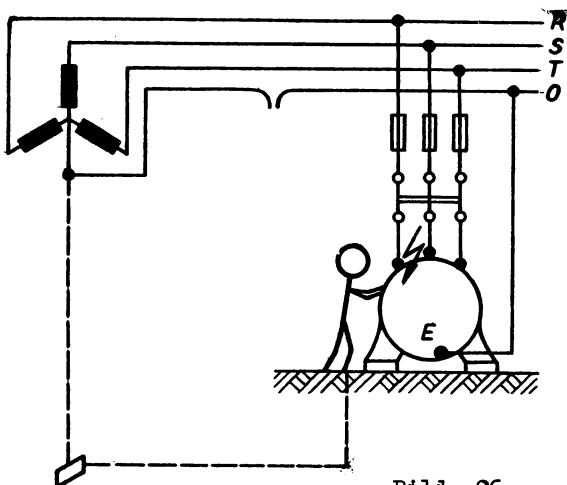


Bild 26
Nulleiterbruch

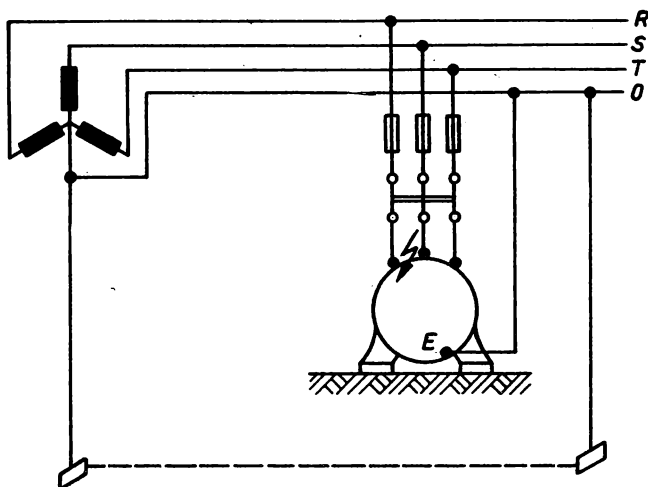


Bild 27
Nulleiterbruch, zwei-seitig geerdet

Weil eine Unterbrechung der Nullungsleitung nicht stattfinden darf, dürfen solche Leitungen weder abgesichert werden, noch abschaltbar sein. Um Verwechslungen mit den Stromleitern zu verhüten, müssen die Nullungsleitungen in ihrem gesamten Verlauf gekennzeichnet sein. Sollen sie ihren Zweck erfüllen, so müssen sie ebenso sorgfältig wie ein Außenleiter verlegt werden. Verbindungen sind daher durch Verschrauben, Vernieten oder Verschweißen herzustellen; ein Verraupen ist unzulässig. Die Nullungsleitungen kann man blank oder geschützt, z.B. in Isolierrohr, verlegen. Bei offenem Verlegen ist mit Rücksicht auf die mechanische Festigkeit ein Mindestquerschnitt von 4 mm^2 , bei geschütztem Verlegen ein Mindestquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ vorgeschrieben.

Bei ortsveränderlichen Geräten, z.B. Handbohrmaschinen, ist für die Nullung ein besonderer Nullungsdraht - der Schutzleiter - mitzuführen. Zur Verwendung kommen besondere Steckvorrichtungen mit Nullungs- bzw. Erdungskontakten. Es sind die Ihnen bekannten Schutzkontaktvorrichtungen. Wie Sie aus Bild 28 ersehen, wird beim Einführen des Schukosteckers in die Schukosteckdose zunächst die Verbindung mit dem Mittelpunktsteiter hergestellt, so daß von vornherein der Berührungsschutz bei evtl. Körperschluß gegeben ist.

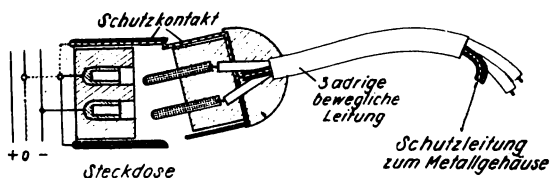


Bild 28
Schutzkontaktvorrichtung

In Netzen, in denen die Nullung zur Anwendung kommt, sind reine Erdungen ohne Verbindung mit dem Mittelpunktsteiter unzulässig, weil dann unter Umständen bei Körperschluß des nur geerdeten Gerätes der ganze Mittelpunktsteiter eine unzulässige Berührungsspannung annehmen kann.

7.6 Schutzschaltung

Wenn Sie die bisher genannten Schutzarten nochmals rückschauend überblicken, werden Sie feststellen, daß

1. die Isolierung - auch bei sorgfältigster Installation - besonders in gefährdeten Räumen auf die Dauer keinen ausreichenden Schutz darstellt;
2. die Anwendung der Kleinspannung - vor allem bei größeren Leistungen - zu unwirtschaftlichen Abmessungen der Leitungen und Geräte führt;
3. die Erdung häufig so kleine Erdübergangswiderstände erfordert, wie sie praktisch sehr schwer oder auch gar nicht herstellbar sind;
4. bei der Nullung ebenfalls kleine Erdübergangswiderstände vorhanden sein müssen und außerdem der Mittelpunktsleiter in vielen Fällen unwirtschaftlich große Querschnitte aufweisen muß.

Außerdem haben Erdung und Nullung noch den Nachteil, daß bei einem Körperschluß meist nur die Sicherung des fehlerhaften Stranges durchbrennt. Wie wirkt sich das bei einem laufenden Drehstrommotor aus?

Alle diese Nachteile vermeidet die Schutzschaltung. Für sie ist ein Selbstausschalter mit Freiauslösung nötig, der eine Fehlerspannungsspule besitzt, die beim Auftreten einer unzulässig hohen Berührungsspannung den gefährdeten Anlagenteil selbsttätig allpolig vom Netz trennt.

Bild 29 zeigt die Wirkungsweise dieses Schutzschalters. Neben der Ihnen schon bekannten magnetischen und thermischen Auslösung enthält der Schutzschalter die erwähnte Fehlerspannungsspule. Diese ist einmal an den zu schützenden Geräteteil, hier an das Motorgehäuse, und zum anderen an eine Hilfserde gelegt. Die Spule ist so berechnet, daß sie den Schalter bei einer Spannung von 24 V in 0,1 s zum Auslösen bringt. Dabei kann der Erdübergangswiderstand der Hilfserde 500...800 Ω betragen. Durch eine Prüftaste kann man die Fehlerspannungs-

spule einschließlich Erdleitung jederzeit auf einwandfreies Arbeiten prüfen.

Die Schutzschalter können noch mit einer Nullspannungsauslösung versehen werden. Sie können dann auch zur Fernschaltung dienen und schalten, wie Ihnen bekannt ist, beim Ausbleiben der Spannung die angeschlossenen Motoren und Geräte allpolig ab. Solche Schutzschalter stellen den vollkommensten Schutz dar, den es heute gibt.

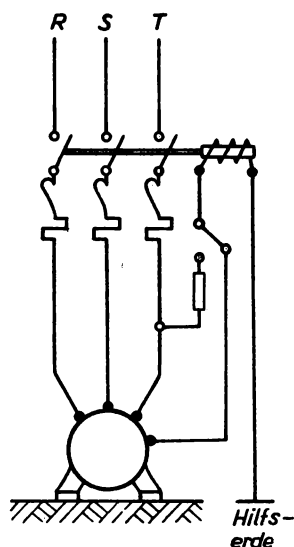


Bild 29
Schutzschaltung

7.7 Unfallquellen

Alle genannten Schutzmaßnahmen erfüllen nur dann ihren Zweck, wenn sie sich in einem einwandfreien Zustand befinden. Das ist aber häufig aus Bequemlichkeit und aus Unkenntnis der damit verbundenen Gefahren nicht der Fall. Achten Sie deshalb auf solche Unfallquellen, zu denen u.a. gehören:

- beschädigte und zerbrochene Stecker, Steckdosen u. Schalter,
- fehlende Schukostecker an Elektrowerkzeugen,
- mangelhafte Kabelbefestigungen an Steckern und Gerätesteckdosen,
- fehlende berührungsschutzsichere Fassungen,
- fehlende und unleserliche Kennzeichnung von Schalterstellungen an Hebelschaltern, Anlassern und Reglern,
- fehlende Bezeichnung von Stromkreisen, Schaltern, Schaltgeräten und Apparaten,
- fehlende oder mangelhafte Erdung von metallenen Gehäusen,

von Schaltern und Steckdosen, Motoren und Geräten,
fehlende Deckel von Abzweig- und Verteilungsdosen,
geflickte, reparierte und beschädigte Sicherungen,
fehlender Schutz von Leitungen oberhalb der Fußböden
und im Handbereich,
Verschmutzung von Motoren, Anlassern, Reglern, Schalt-
kästen und Verteilungen,
nicht einwandfrei befestigte Kabel,
fehlende Warnungsschilder, Betriebsvorschriften, An-
leitung zur Ersten Hilfe.

Veranlassen Sie, daß solche und ähnliche Mängel in elektri-
schen Anlagen durch Fachkräfte abgestellt werden. Sie helfen
dann mit, das wertvollste Gut unserer werktätigen Menschen,
ihre Gesundheit und Arbeitskraft, zu erhalten.

Zusammenfassung =====

Unter Berührungsspannung versteht man die Spannung gegen Erde,
die nicht stromführende, berührbare, metallische Konstruk-
tionsteile in elektrischen Anlagen durch Schäden oder andere
Unregelmäßigkeiten annehmen können.

Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung sind:
Isolierung, Kleinspannung, Erdung, Nullung und Schutzschaltung.
Isolieren heißt, die Berührung spannungsführender Teile unmög-
lich machen, indem man sie mit nichtleitenden Stoffen umgibt.
Dieser Schutz setzt voraus, daß eine Beschädigung der Isola-
tion nicht zu erwarten ist und auch keine Beeinträchtigung
der Isolation durch Feuchtigkeit, Wärme usw. erfolgt.

Kleinspannungen sind Spannungen bis 42 V. Kleinspannungen
müssen in besonders feuchten Räumen und überall dort verwen-
det werden, wo die Möglichkeit großflächiger Berührung metal-

lischer Teile besteht. Für Kinderspielzeuge sind 24 V vorgeschrieben.

Erdung bedeutet das Herstellen einer gut leitenden Verbindung mit dem Erdpotential. Es gibt Platten-, Rohr- und Band-erder.

Bei der Betriebserdung führt die Erdleitung - auch im ungestörten Betrieb - Strom, die Schutzerdung nur im gestörten Betrieb. Die Schutzerdung verlangt einen sehr kleinen Erdübergangswiderstand. Die Schutzerdungsleitung muß in ihrem ganzen Verlauf gekennzeichnet sein.

Nullung bedeutet die Verbindung des zu schützenden Teiles mit dem betriebsmäßig geerdeten Mittelpunktsleiter. Der Mittelpunktsleiter darf nicht abgesichert und muß in seinem ganzen Verlauf kenntlich verlegt werden.

Bei ortsveränderlichen Stromverbrauchern kommen die Schutzvorrichtungen zur Anwendung.

Die Schutzschaltung erfordert gegenüber der Erdung und Nullung keine besonders gute Erde. Bei ihr sind Selbstausschalter mit Freiauslösung und mit einer Fehlerspannungsspule nötig. Schutzschalter mit Fehlerspannungs- und Nullspannungsauslösung stellen den besten Motorschutz dar.

Ü b u n g e n

15. Was schreibt das Vorschriftenwerk (VDE) als Schutzmaßnahmen gegen zufällige Berührung vor?
16. Was versteht man unter Berührungsspannung?
17. Welche Schutzmaßnahmen werden gegen zu hohe Berührungsspannung verwendet?
18. Warum kommt es beim Berühren eines Leiters mit einer normalen Betriebsspannung von 220 V verhältnismäßig selten

zu schweren Unglücksfällen?

19. Worin besteht der Unterschied zwischen
 - a) Betriebs- und Schutzerdung,
 - b) Erdung und Nullung?
20. Erklären Sie den vierfachen Schutz eines Motorschutzschalters mit Nullspannungsauslösung!

ANTWORTEN UND LÖSUNGEN

1. $ED = 40\%$; $t_a + t_r = 4 \text{ Std.}$; $t_a = 1,6 \text{ Std.}$
2. Der Unterschied zwischen KB und AB besteht darin, daß in den spannungslosen Pausen der Maschine bei KB die Maschine auf die Kühlmitteltemperatur abkühlt und bei AB nicht. Bei DKB wird die Beharrungstemperatur bei Leerlauf erreicht und bei DAB nicht.
3. Bei Massen, die beschleunigt werden sollen, wirkt das dynamische Moment bremsend. Sollen beschleunigte Massen abgebremst werden, dann wirkt das dynamische Moment treibend.
4. Übergangszustände sind vorhanden beim Anlauf, beim Bremsen, bei der Drehrichtungsänderung (Reversierung) und bei allen Drehzahländerungen.
5. Bei Belastungsänderung ändert sich die Drehzahl des Reihenschlußmotors. Die Drehmaschine muß aber mit belastungsunabhängiger Drehzahl laufen.
6. Beim Betriebspunkt B_2 ist stabiler Betrieb vorhanden, bei B_1 labiler. Eine geringe Drehzahlerhöhung bei labilem Betrieb würde dazu führen, daß die Drehzahl bis zum Betriebspunkt B_2 anwächst; ein geringer Drehzahlabfall, daß die Drehzahl immer weiter bis Null abfällt.
7. Die Motoren müssen Reihenschlußverhalten aufweisen.

$$8. t = \frac{G \cdot D^2 \cdot n}{375 \cdot M}$$

$$GD^2 = G_1 D_1^2 \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 + G_2 D_2^2 \left(\frac{n_2}{n} \right)^2$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$n = n_1 (1 - \sigma) = 960 \text{ min}^{-1}$$

$$GD^2 = 1,5 \left(\frac{960}{960} \right)^2 + 300 \left(\frac{250}{960} \right)^2 = 21,84 \text{ kpm}^2$$

$$M = 975 \cdot \frac{N}{n} = 11,17 \text{ kpm}$$

$$t = 5,0 \text{ s}$$

$$9. N \geq N_A$$

$$N_A = 39,45 \text{ kW}; \text{ gewählt ein Motor mit } N = 40 \text{ kW.}$$

$$10. \text{ Zugeführte Motorleistung } N_w = \frac{160}{0,9} = 178 \text{ kW}$$

$$N_s = 312 \text{ KVA}$$

11. Ein Elektromagnet, der durch einen schwachen Steuerstrom erregt wird, betätigt über einen Mechanismus den Schalter des zu steuernden Stromkreises entsprechend Bild 17.

12. Die Vorteile des Schutzschalters gegenüber der Sicherung sind:

- a) allpoliges Abschalten des Stromkreises;
- b) Schutz der Leitungen und angeschlossenen Verbraucher gegen Überlastung und Kurzschluß;
- c) Unterbrechung des Stromkreises beim Ausbleiben oder einem 60...70%igen Absinken der Spannung;
- d) sofortige Wiedereinschaltmöglichkeit nach Beseitigung der Störung.

13. Die Unterspannungsauslöser verhindern, daß beim Wiedergehen der Netzspannung ein unbeabsichtigtes Anlaufen der Motoren erfolgt.

14. Schutzschalter, die zur Fernsteuerung benutzt werden sollen, müssen mit Nullspannungsauslösung versehen sein.

15. Die unter Spannung stehenden, nicht mit Isolierstoff bedeckten Teile müssen im Handbereich gegen zufällige Berührung geschützt sein. Abdeckungen, wie Schutzgitter und dergleichen, müssen mechanisch widerstandsfähig und zuverlässig befestigt sein. Schutzverkleidung der Leitungen müssen in die Maschinen und in die Geräte eingeführt werden.
16. Berührungsspannung ist die Spannung gegen Erde, die metallische Konstruktionsteile in elektrischen Anlagen, die der Berührung zugänglich sind, durch Schäden oder andere Unregelmäßigkeiten annehmen können.
17. Als Schutzmaßnahmen kommen in Frage: Isolierung, Klein-spannung, Erdung, Nullung, Schutzschaltung.
18. Meist steht die betreffende Person auf trockenem Boden, so daß ein hoher Erdübergangswiderstand vorhanden ist.
19. a) Die Leitungen der Betriebserdung führen auch im normalen Betrieb Strom; die Leitungen der Schutzerdung nur im Störfalle.
b) Durch die Erdung sind die zu schützenden Konstruktionsteile gut leitend mit dem Erdpotential verbunden, bei der Nullung mit dem betriebsmäßig geerdeten Nulleiter. Während die Erdung überall vorgenommen werden kann, ist Nullung nur in Gleichstrom-Dreileiter- und in Drehstrom-Vierleiternetzen möglich.
20. Es erfolgt Auslösung des Schalters:
 1. durch die thermischen Auslöser bei Überleistung;
 2. durch die elektromagnetischen Auslöser bei Kurzschluß;
 3. durch die Fehlerspannungsauslösung bei Gehäuseschluß;
 4. durch die Nullspannungsauslösung bei Ausbleiben der Netzspannung oder einem Rückgang derselben um 60...70%.

