

**HANDBUCH**  
**FÜR DEN**  
**FERNMELDEHANDWERKER**  
**der Deutschen Bundespost**



**BAND B 4**

**DIE WECHSELSTROMLEHRE**

---

**HERAUSGEBER: DEUTSCHE POSTGEWERKSCHAFT-HAUPTVORSTAND**  
**6 FRANKFURT**

# Handbuch für den Fermeldehandwerker der DBP

(zur Vorbereitung auf die Fermeldehandwerkerprüfung)

# 14

*wichtige Lehr- und Lernwerke für den FLehrl; auch für den Handwerker (F) und den Fermeldehandwerker gut geeignet!*

## Band A 1 — Allgemeines Prüfungswissen

Weg und Ziel der Ausbildung — Der Lehrvertrag — Die Fermeldehandwerkerprüfung — Die Tätigkeitsgebiete des Fermeldehandwerkers, sein beruflicher Werdegang und seine Aufstiegsmöglichkeiten — Der Tarifvertrag — Gesetze und Verordnungen des Fernmeldewesens — Vorschriften zum Schutz gegen Starkstrom und Unfallschäden

## Band A 2 — Allgemeines Prüfungswissen

Allgemeines über den Staatsaufbau — Aufgaben und Gliederung der DBP — Die Sozialeinrichtungen bei der DBP — Allgemeines über Dienst- und Arbeitsunfälle — Allgemeines aus der Geschichte des Post- und Fernmeldewesens — Wie fertige ich meine schriftlichen Prüfungsarbeiten? — Musterausarbeitungen und Musterthemen

## Band B 1 — Die Fachkunde

Einführung in die Mathematik — Grundgesetze der Physik

## Band B 2 — Die Fachkunde

Fachzeichnen — Technisches Zeichnen — Stromlaufzeichnen

## Band B 3 — Die Fachkunde

Die Gleichstromlehre

— Weitere Lehr- und Lernwerke siehe 3. und 4. Umschlagseite —

# HANDBUCH

FÜR DEN

## FERNMELDEHANDWERKER

### der Deutschen Bundespost



**BAND B 4**

## Die Wechselstromlehre

HERAUSGEBER: DEUTSCHE POSTGEWERKSCHAFT - HAUPTVORSTAND  
FRANKFURT (MAIN)

*Privatstück CFT-Lehrbeamter*

## Vorwort

Die vierzehn Bände des „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ sollen

1. den Fernmeldelehrlingen während der Lehrzeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen,
2. den Handwerkern (F) aufzeigen, welches Fachwissen erforderlich ist, um genauso viel zu wissen wie die Lehrlinge am Ende ihrer Lehrzeit und
3. den Fernmeldehandwerkern die Möglichkeit geben, ihr Wissen aufzufrischen und es auf den neuesten Stand der Fernmeldetechnik zu bringen.

In der Fernmeldehandwerkerprüfung, in den Grundlagen- und Aufbaulehrgängen müssen neben dem rein praktischen technischen Können auch die theoretischen Fachkenntnisse über die Fernmeldetechnik vorhanden sein. Das gleiche gilt hinsichtlich des wichtigen allgemeinen Prüfungswissens sowie in bezug auf die Grundkenntnisse über die für das Fernmeldewesen wichtigen Gesetze und Verordnungen, wie FAG, TWG und FO. Einer der Bände allein kann dem Leser dieses umfangreiche Wissen nicht vermitteln; alle vierzehn Bände zusammen (vgl. hierzu die Angaben auf der 2. und 3. Umschlagseite) enthalten jedoch das Fachwissen, das sich der Leser im Interesse seines Prüfungserfolges und seines weiteren Aufstiegs aneignen muß.

In dem „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ ist nur der unbedingt notwendige Lehrstoff in einfachster Form behandelt worden. Die Verfasser erheben nicht den Anspruch, daß die Bände alle Vorschriften und technischen Einzelheiten sowie das in der Praxis selten oder gar nicht Vorkommende enthalten. Ihnen ging es vielmehr darum, eine

### **Fibel**

für den Fernmeldelehrling,  
für den Handwerker (F) und  
für den Fernmeldehandwerker

zu schaffen, die der gestellten Aufgabe im Interesse der Leser ohne unnötigen Ballast gerecht wird.

Druck Oktober 1962

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

# INHALTSVERZEICHNIS

Seite

## A. Der Magnetismus

<b>I. Der Dauermagnetismus</b> .....	11
1. Die Naturerscheinung „Magnetismus“ .....	11
2. Form und Aufbau der Magnete .....	12
a) Magnetpole .....	12
b) Molekularmagnete .....	15
3. Das magnetische Feld .....	16
a) Magnetische Kraftlinien .....	17
b) Eisen im Magnetfeld .....	18
c) Die magnetische Induktion .....	18
d) Die Abschirmung magnetischer Felder .....	19
e) Die Größe des magnetischen Kraftflusses .....	20
4. Übungsaufgaben .....	20
<b>II. Der Elektromagnetismus</b> .....	21
1. Das Magnetfeld eines Leiters .....	21
2. Das Magnetfeld einer Spule .....	22
a) Der Verlauf der Kraftlinien .....	22
b) Die Stärke des Magnetfeldes .....	24
3. Die Spule mit Eisenkern .....	28
a) Die magnetische Leitfähigkeit .....	28
b) Die Ummagnetisierungsvorgänge .....	30
c) Magnetisierungskurven .....	31
4. Anwendungsbeispiele .....	32
a) Das Relais .....	32
b) Der Wecker .....	33
c) Der Fernhörer .....	34
5. Übungsaufgaben .....	36
<b>III. Die Fremdinduktion</b> .....	36
1. Der Leiter im Magnetfeld .....	36
2. Der Induktionsstrom .....	37
a) Die Lenzsche Regel .....	38

	Seite
3. Die Induktionsspannung .....	39
a) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Windungszahl .....	39
b) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Kraftfeldänderung .....	40
c) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion .....	40
4. Wirbelströme .....	42
a) Die Wirbelstrombremsung .....	44
b) Die Verringerung der Wirbelströme .....	44
5. Anwendungsbeispiele .....	45
a) Der Transformator .....	45
aa) Das Verhältnis der Spannungen .....	46
bb) Das Verhältnis der Ströme .....	48
b) Die Induktionsspule .....	51
c) Der Übertrager .....	51
6. Übungsaufgaben .....	52
<b>IV. Die Selbstinduktion</b> .....	<b>52</b>
1. Die Richtung des Selbstinduktionsstromes .....	53
2. Die Selbstinduktionsspannung .....	54
3. Die Induktivität .....	54
a) Veränderung der Induktivität .....	55
b) Die Schaltung von Induktivitäten .....	55
4. Übungsaufgaben .....	57
<b>V. Bewegung durch Induktion</b> .....	<b>57</b>
1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld .....	57
2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld .....	59
3. Der Aufbau eines Gleichstrommotors .....	62
4. Übungsaufgaben .....	62
<b>B. Grundlagen der Wechselstromlehre</b>	
<b>I. Die Entstehung des Wechselstromes</b> .....	<b>63</b>
1. Die bewegte Spule im Magnetfeld .....	63
a) Die Wechselspannung .....	64
b) Der Wechselstrom .....	64

	Seite
2. Die Frequenz des Wechselstromes .....	64
a) Der Verlauf der Wechselspannung .....	64
b) Der Leiter schneidet die Kraftlinien .....	65
c) Die Feldänderung .....	65
d) Die Periode und die Frequenz .....	66
3. Die Frequenz und die Anzahl der Polpaare .....	66
4. Effektiv- und Maximalwerte .....	67
5. Übungsaufgaben .....	68
<b>II. Spannungserzeuger</b> .....	<b>69</b>
1. Der Kurbelinduktor .....	69
2. Generatoren .....	70
a) Der Wechselstromgenerator .....	70
b) Der Gleichstromgenerator .....	71
<b>III. Wechselstromwiderstände</b> .....	<b>72</b>
1. Der Ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis .....	72
2. Die Spule im Wechselstromkreis .....	73
a) Wirk-, Schein- und Blindwiderstand .....	74
b) die Kreisfrequenz .....	75
c) Induktiver Widerstand und Frequenz .....	76
d) Die Drosselspule .....	76
e) Die Phasenverschiebung .....	77
f) Die Berechnung der Widerstandswerte einer Spule .....	80
aa) Zeiger- und Liniendiagramme .....	80
bb) Rechnerische Bestimmung .....	83
3. Der Kondensator im Wechselstromkreis .....	85
a) Kapazitiver Widerstand und Frequenz .....	86
b) Die Phasenverschiebung .....	87
c) Zeiger- und Liniendiagramm .....	88
4. Übungsaufgaben .....	89
<b>IV. Die Wechselstromleistung</b> .....	<b>89</b>
1. Übungsaufgaben .....	94
<b>V. Der Mehrphasenwechselstrom</b> .....	<b>95</b>
1. Der verkettete Wechselstrom .....	95
a) Die Sternschaltung .....	97
b) die Dreieckschaltung .....	98

	Seite
2. Die Drehstromleistung .....	100
3. Das Drehfeld .....	101
4. Der Synchronmotor .....	102
5. Der Asynchronmotor .....	102
6. Übungsaufgaben .....	103
 <b>C. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis</b>	
<b>I. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen</b> .....	104
1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand .....	104
2. Wirkwiderstand und kapazitiver Widerstand .....	106
3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand .....	108
4. Das Widerstandsdreieck .....	110
5. Spannungs- und Stromdreieck .....	111
<b>II. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen</b> .....	112
<b>III. Die Resonanz</b> .....	112
1. Die Reihenresonanz .....	113
2. Die Parallelresonanz .....	116
<b>IV. Elektrische Filter und Weichen</b> .....	119
1. Das Tiefpaßfilter .....	119
2. Das Hochpaßfilter .....	120
3. Bandfilter .....	120
4. Siebketten .....	121
<b>V. Übungsaufgaben</b> .....	121
 <b>D. Vorgänge auf elektrischen Leitungen</b>	
<b>I. Die Übertragung von Sprache und Zeichen</b> .....	122
<b>II. Die Übertragungseigenschaften der Leitungen</b> .....	122
1. Die Leitfähigkeit .....	123
2. Die Ableitung .....	123

	Seite
3. Die Leitungsinduktivität .....	123
4. Die Leitungskapazität .....	124
5. Wechselwirkung zwischen Induktivität und Kapazität .....	124
6. Der Wellenwiderstand .....	125
7. Die Dämpfung .....	126
8. Die Verzerrungen .....	128
9. Das Nebensprechen .....	129
10. Starkstrombeeinflussung .....	130
<b>III. Die Mehrfachausnutzung von Leitungen</b> .....	130
1. Die Phantomschaltung .....	130
2. Die Trägerfrequenztechnik .....	132
<b>IV. Übungsaufgaben</b> .....	132

**Anhang**

Tabelle der Sinus-, Cosinus- und Tangenswerte

Tabelle der Leitungseigenschaften von Freileitungsdrähten und Kabeladern

# A. Der Magnetismus

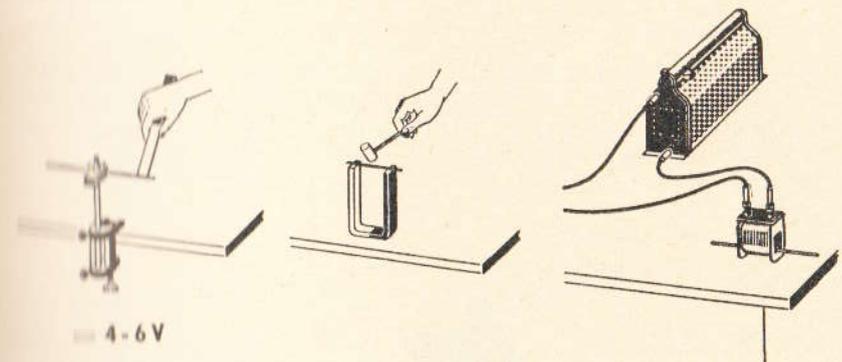
## I. Der Dauermagnetismus

### 1. Die Naturerscheinung „Magnetismus“

Einige Jahrhunderte vor Christi Geburt wurden in der Nähe des Ortes Magnesia in Kleinasien Steine gefunden, die die Eigenschaft hatten, Eisen anzuziehen und festzuhalten. Nach dem Fundort nannte man diese Steine „Magneteisensteine“. Die den Magneteisensteinen innewohnende Kraft ist eine Naturerscheinung wie die Elektrizität.

Die Magneteisensteine nennt man auch „natürliche Magnete“ im Gegensatz zu den „künstlichen Magneten“, die, wie es der Name schon sagt, auf künstlichem Wege hergestellt worden sind. Abb. 1 zeigt, wie man künstliche Magnete herstellen kann:

#### Entstehung künstlicher Magnete

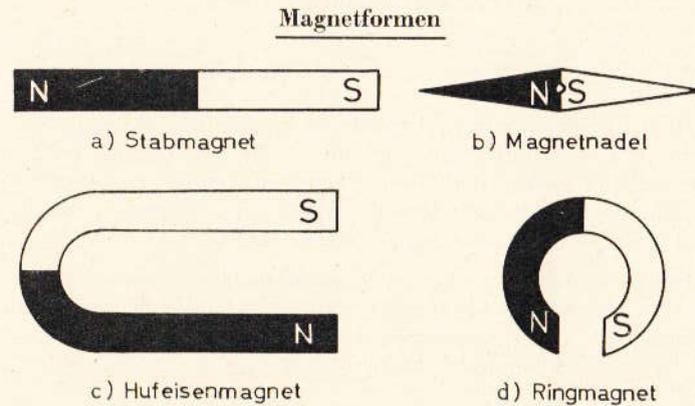


(Abb. 1)

- Eine unmagnetische Stricknadel wird mit dem einen Ende eines Dauermagneten bestrichen.
- Ein über die Schenkel eines Hufeisenmagneten gelegter Stahlstab wird beklopft.
- Herstellung eines künstlichen Magneten mit Hilfe des elektrischen Stromes.

## 2. Form und Aufbau der Magnete

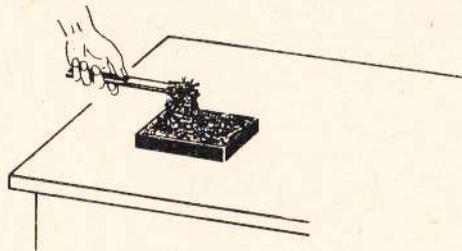
Die Abb. 2 zeigt die gebräuchlichsten Arten der in der Technik verwendeten Magnete.



(Abb. 2)

### a) Magnetpole

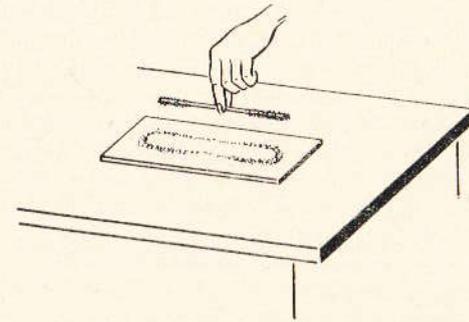
Einen Magneten nach der Abb. 2a wollen wir näher untersuchen. Wir halten ihn dicht über ein Häufchen Eisennägel (Abb. 3), der Magnet zieht die Nägel an und hält sie fest. Wir beobachten dabei, daß an dem Ende des Magneten mehr Nägel festgehalten werden als in der Mitte.



(Abb. 3)

Wir wollen jetzt statt des Stabmagneten eine magnetisierte Stricknadel verwenden und sie mit feinen Eisenfeilspänen bestreuen (Abb. 4). An den beiden Enden der Nadel hängen die Späne in dicken Trauben, während in der Mitte keine Späne vorhanden sind. Wenn wir nun die Stricknadel

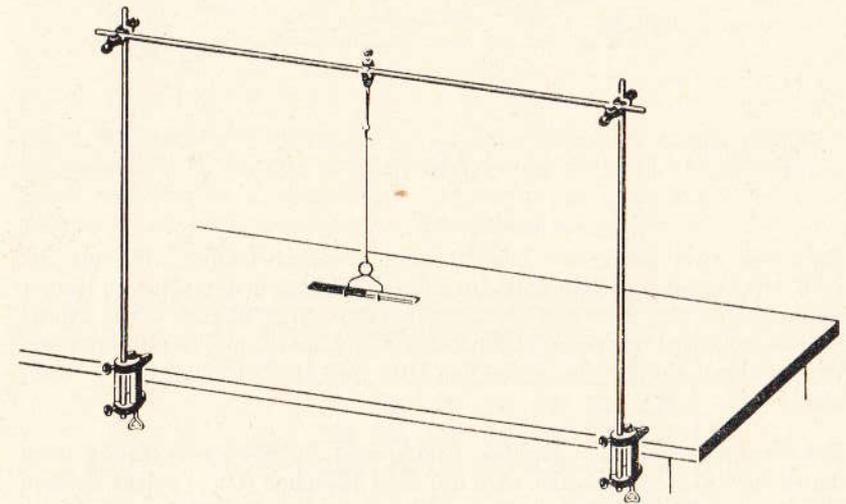
in der Mitte durchschneiden, und die beiden Teile wiederum mit Eisenfeilspänen bestreuen, so sehen wir, daß die Anordnung der Späne auf beiden Teilen die gleiche ist, wie vorher auf der ursprünglichen Strick-



(Abb. 4)

nadel. Die magnetische Kraft ist an den Enden eines Magneten besonders groß. Die Enden eines Magneten nennt man **Magnetpole**.

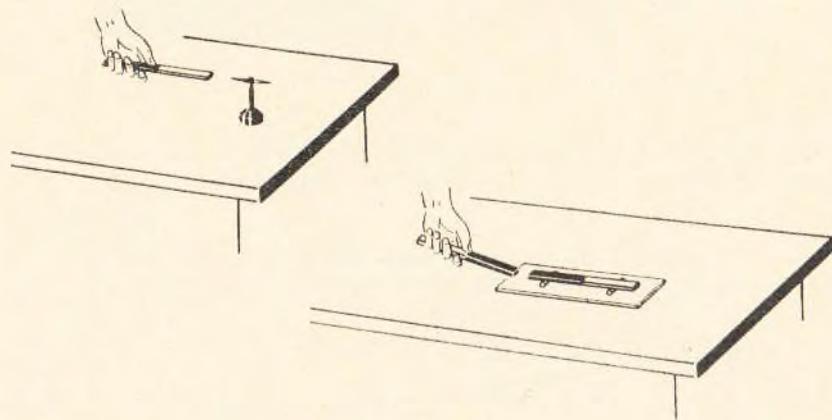
### Die Richtkraft eines Magneten



(Abb. 5)

Wir wollen einen weiteren Versuch nach Abb. 5 machen. Unser frei aufgehängter Stabmagnet stellt sich nach kurzem Pendeln in die Nord-Süd-Richtung der Erde ein. Bei dieser Einstellung weist immer ein bestimmter Magnetpol (Ende des Magnetes) nach Norden und der andere nach Süden. Deshalb nennt man das nach Norden weisende Ende des Stabmagneten **Nordpol** und das entgegengesetzte (nach Süden weisende) Ende **Südpol**. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, die Magnetnadel zur Orientierung zu verwenden (Kompaß). Durch das Spiel der Magnetnadel über einer Skala ist die eingeschlagene Himmelsrichtung genau festzustellen. Dabei muß jedoch die sogenannte Mißweisung berücksichtigt werden, die die Abweichung des geographischen vom magnetischen Nordpol angibt.

### Die Wechselwirkung zweier Magnete



(Abb. 6)

Zwischen zwei Magneten besteht eine Wechselwirkung, die uns die Abb. 6 veranschaulichen soll. Im linken Bild wird dem Nordpol einer Magnetnadel der Nordpol eines Stabmagneten genähert – die Nadel weicht aus; wird nun dem Nordpol der Nadel der Südpol des Stabmagneten genähert, so folgt die Nadel den Hin- und Herbewegungen des Stabmagneten.

Ein Versuch nach dem rechten Bild macht die Wechselwirkung noch deutlicher. Ein Stabmagnet wird auf zwei Röllchen (Glas) gelegt, seinem Nordpol wird der Nordpol eines anderen Stabmagneten genähert, der erste Stabmagnet weicht nach rechts aus. Bei der Annäherung eines

Südpols an den Nordpol des liegenden Magneten wird dieser in Richtung nach links auf den genäherten Stabmagneten zu bewegt.

Aus der soeben gewonnen Erkenntnis ergibt sich die Grundregel:

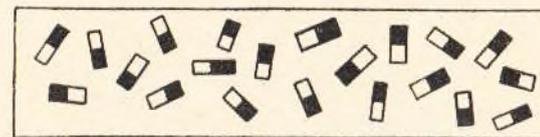
**Gleichnamige magnetische Pole stoßen sich ab, ungleichnamige magnetische Pole ziehen sich an.**

### b) Molekularmagnete

Wir haben bei dem Versuch nach Abb. 4 bereits gesehen, daß nach dem Durchschneiden der magnetisierten Stricknadel beide Teile die gleichen Eigenschaften zeigten wie die Stricknadel vor dem Schnitt. Würden wir nun jede Hälfte der Nadel nochmals teilen, so würden wir feststellen, daß in jedem neuen Teil wiederum ein vollkommener Magnet mit einem Nord- und einem Südpol entstanden ist. Denkt man sich die Teilung der Stricknadel immer weiter fortgeführt bis zu den kleinsten Teilchen, den Molekülen, so kann man sich vorstellen, daß diese die eigentlichen Träger des Magnetismus sind. Man spricht deshalb auch von den **Molekularmagneten**.

In einem unmagnetisierten Eisenstück sind die Molekularmagnete regellos verteilt, so daß die Wirkung der einzelnen Magnete aufgehoben ist (Abb. 7).

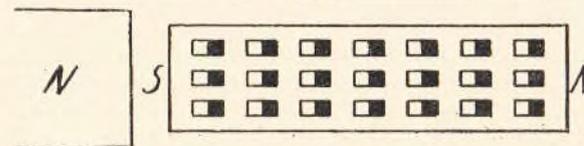
### Ungeordnete Lage der Molekularmagnete



(Abb. 7)

Durch Bestreichen des Eisenstücks mit einem Magneten werden die Molekularmagnete in die gleiche Richtung gezwungen (Abb. 8), ihre freien Nord- und Südpole vereinigen ihre Wirkung zu einem starken Nord- bzw. Südpol des nunmehr entstehenden künstlichen Magneten.

### Lage der Molekularmagnete nach der Beeinflussung durch einen Dauermagneten



(Abb. 8)

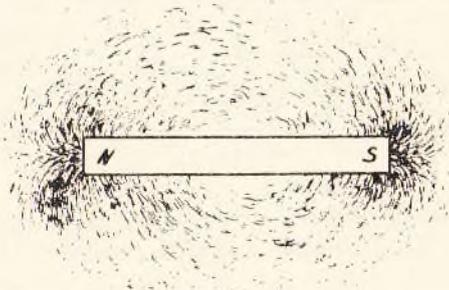
Liegen alle Molekularmagnete durch das Bestreichen in ein und derselben Richtung, so ist die größtmögliche magnetische Wirkung in dem Eisenstück erreicht worden. Ein weiteres Bestreichen würde die magnetische Kraft nicht mehr vergrößern, weil bereits alle vorhandenen Molekularmagnete ausgerichtet sind. Diesen Zustand nennt man Sättigung.

Das Magnetisieren ist also das Ausrichten der Molekularmagnete. Bei weichem Eisen wird die Ausrichtung der Molekularmagnete durch die Wärmebewegung der Moleküle schnell wieder zerstört, sobald die magnetisierende Kraft nicht mehr wirkt. Eisen eignet sich daher schlecht zur Herstellung von Magneten. Bei Stahl dagegen bleiben die Molekularmagnete in der einmal aufgezungenen Richtung, die magnetische Kraftwirkung ist dauernd vorhanden. Man spricht deshalb von Dauermagnetismus oder von permanentem Magnetismus. Nach dieser Erkenntnis werden hochwertige Dauermagnete aus Stahl oder Stahllegierungen (Zusätze von Aluminium, Kobalt, Nickel u. a.) hergestellt.

### 3. Das magnetische Feld

Im Versuch nach Abb. 9 wird auf einen Stabmagneten eine Glasplatte gelegt, auf die wir feine Eisenfeilspäne streuen. Wir klopfen leicht an die Scheibe und sehen, daß die Späne sich zu Linien formieren, die ihren

Kraftlinienbild eines Stabmagneten



(Abb. 9)

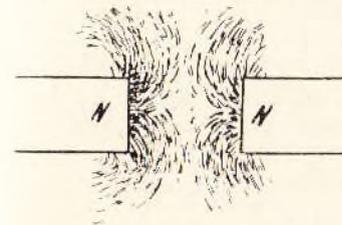
Ausgang an den Polen haben und die sich kreisförmig schließen. Diese Linien zeigen die Richtung der magnetischen Kraft an, man nennt sie deshalb magnetische Kraftlinien.

Um einen Magneten ist der ihn umgebende Raum vollständig mit Kraftlinien angefüllt; der Magnet ist von einem Kraftfeld, von dem magnetischen Feld, umgeben. In diesem Feld durchlaufen die Kraftlinien auch das Innere (den Werkstoff) des Magneten und bilden somit einen geschlossenen Kraftlinienzug.

#### a) Magnetische Kraftlinien

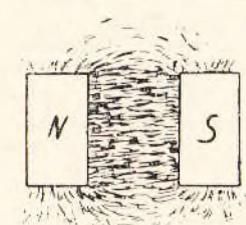
Die in Abb. 7 gezeigte Wechselwirkung zweier Magnete wird durch die in den Abb. 10 und 11 gezeigten Kraftlinienbilder verdeutlicht. Während

Gleichnamige Pole



(Abb. 10)

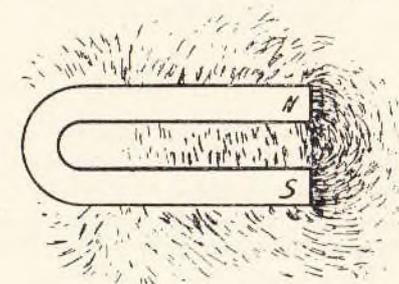
Ungleichnamige Pole



(Abb. 11)

sich beim Gegenüberstehen gleichnamiger Pole (Abb. 10) die Kraftlinien voneinander fortbiegen, gehen sie beim Gegenüberstehen ungleichnamiger Pole (Abb. 11) ineinander über.

Kraftlinienbild eines Hufeisenmagneten



(Abb. 12)

Abb. 12 zeigt den Kraftlinienverlauf bei einem Hufeisenmagneten. Innerhalb der Schenkel des Magneten erkennen wir parallel verlaufende, nicht streuende Kraftlinien. Das magnetische Feld ist hier gleichförmig, es ist ein homogenes magnetisches Feld<sup>1)</sup>. Außerhalb der Schenkel verlaufen die Kraftlinien in einem weiten Bogen vom Nord- zum Südpol. Hier ist das Feld nicht mehr von dichtgeschlossenen und parallel verlaufenden

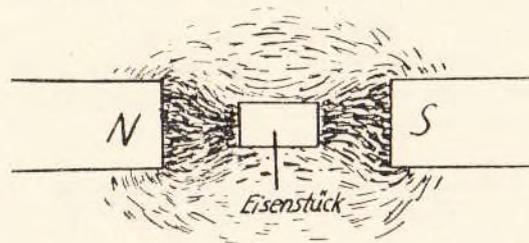
<sup>1)</sup> Vergleiche: „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ Band B 3 unter G „Elektrisches Feld“.

Kraftlinien durchzogen, sondern es wird um so aufgelockert, je weiter es von den Magnetpolen entfernt ist. Außerhalb der Schenkel eines Hufeisenmagneten ist das magnetische Feld also **inhomogen**, ungleichförmig. Die Kraftlinien streuen weit und durchziehen einen weiten Luftweg. Man spricht hier auch von dem **Streifeld** eines Magneten.

### b) Eisen im Magnetfeld

Wird in das Feld eines Magneten nach Abb. 13 ein Stück Weicheisen gebracht, so verläuft die weitaus größere Anzahl der Kraftlinien durch das Eisen. Die Kraftlinien bevorzugen den Weg durch das Weicheisen

#### Kraftlinienbild nach dem Einbringen von Eisen in das Magnetfeld



(Abb. 13)

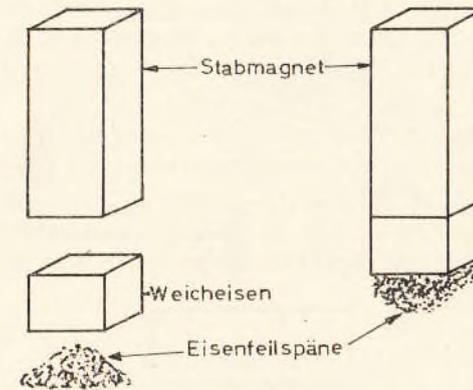
gegenüber dem Weg durch die Luft. **Das bedeutet, daß das weiche Eisen die Kraftlinien besser leitet als die Luft.** Man sagt, die magnetische **Durchlässigkeit (Permeabilität)** des Eisens ist größer als die der Luft. Die Durchlässigkeit wird mit dem griechischen Buchstaben  $\mu$  (müh) bezeichnet. **Luft hat eine Permeabilität von  $\mu = 1$** ; durch besonders legiertes Eisen kann für  $\mu$  der Wert 100 000 erreicht werden.

### c) Die magnetische Induktion

Bei einem Versuch nach Abb. 14 halten wir zwischen ein Häufchen Eisenfeilspäne und einen Dauermagneten ein Weicheisenstück. Es ereignet sich nichts. Nun nähern wir den Dauermagneten dem Weicheisenstück, bis er es anzieht; gleichzeitig werden aber auch die Eisenfeilspäne von dem Magneten durch das Eisenstück hindurch angezogen. **Die Molekularmagnete des Weicheisens müssen also von dem Dauermagneten so ausgerichtet worden sein, daß sie selbst als Magnet wirken. Man nennt diesen Vorgang magnetische Induktion.** Wenn wir nun wieder eine Trennung zwischen Dauermagnet und Weicheisen vornehmen, kehren die

Molekularmagnete im Weicheisen in ihre vorherige ungeordnete Lage zurück, das Eisen wird wieder unmagnetisch und die Eisenfeilspäne fallen ab. Bei härterem Eisen (Stahl) fallen nach der Trennung nicht alle Molekularmagnete in ihre alte Unordnung zurück, ein Teil behält die vorher aufgezwungene Richtung bei, so daß ein Rest des Magnetismus (**Restmagnetismus oder Remanenz**) vorhanden bleibt.

#### Magnetische Induktion

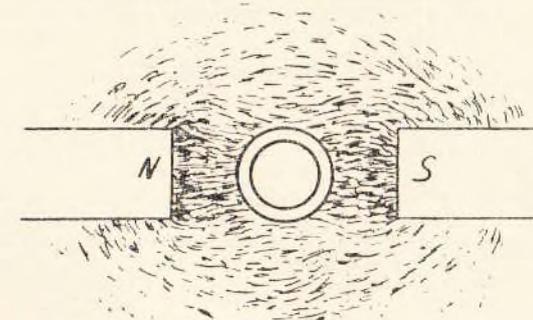


(Abb. 14)

### d) Die Abschirmung magnetischer Felder

Bringen wir statt eines Weicheisenstückes einen Eisenring in das Feld eines Magneten, so zeigt sich, daß die Kraftlinien durch das Eisen des

#### Schirmwirkung eines Eisenringes



(Abb. 15)

Ringes hindurchgehen. Der Raum innerhalb des Ringes aber bleibt völlig frei von Kraftlinien (Abb. 15).

■ Ein Eisenring hat gegen magnetische Felder abschirmende Wirkung.

Diese Tatsache macht man sich zunutze, indem man z. B. hochempfindliche Meßgeräte gegen die Störung durch Magnetfelder (Erdfeld) in einen eisernen Käfig einbaut.

e) Die Größe des magnetischen Kraftflusses

Die Anzahl der Kraftlinien, die aus einer bestimmten Fläche austreten, ist maßgebend für die Kraft, mit der ein Magnet ein Eisenstück anzieht. Unter Zugrundelegung einer Flächeneinheit von 1 cm<sup>2</sup> kann gesagt werden:

■ Eine Kraftlinie je 1 cm<sup>2</sup> Austrittsfläche ergibt eine Feldliniendichte (oder magnetische Induktion) von einem Gauß (G)<sup>1)</sup>.

Den gesamten magnetischen Kraftlinienfluß (auch Kraftfluß) eines Magneten erhalten wir, wenn wir die gesamte Austrittsfläche der Kraftlinien eines Poles mit der Kraftliniendichte (auch Feldliniendichte) multiplizieren:

$$\Phi = B \cdot A$$

wobei  $\Phi$  (griechischer Buchstabe phi) = Kraftfluß,  $B$  = Kraftliniendichte und  $A$  = Austrittsfläche bedeuten.  $B$  ist in Gauß und  $A$  in cm<sup>2</sup> einzusetzen, dann ergibt sich  $\Phi$  in Maxwell<sup>2)</sup>.

Beispiel:

Ein Stabmagnet mit einem Polquerschnitt von 12 cm<sup>2</sup> soll eine magnetische Kraftliniendichte von 500 Gauß haben. Wie groß ist der magnetische Kraftfluß?

Gegeben:  $A = 12 \text{ cm}^2$ ,  $B = 500 \text{ G}$

Gesucht:  $\Phi$

Lösung: Wir setzen die gegebenen Werte in die Formel ein und erhalten  
 $\Phi = B \cdot A = 500 \cdot 12 = 6\,000 \text{ Maxwell}$

#### 4. Übungsaufgaben

a) Wie verhält sich eine Magnetnadel in der Nähe von Eisenteilen? b) Nenne die gebräuchlichsten Arten der in der Technik verwendeten Magneten. c) Wodurch kann man Eisen oder Stahl magnetisch machen? d) Wie verhalten sich gleichnamige und ungleichnamige magnetische Pole zueinander? e) Was sind Molekularmagnete? f) Was versteht man unter magnetischer Sättigung? g) Was sind Permanentmagnete? h) Erkläre den Unterschied zwischen einem homogenen und einem inhomogenen magnetischen Feld. i) Was versteht man unter Permeabilität? k) Erkläre den Vorgang der magnetischen Induktion. l) Was ist Remanenz? m) Erläutere die Formel für die Errechnung des magnetischen Kraftflusses.

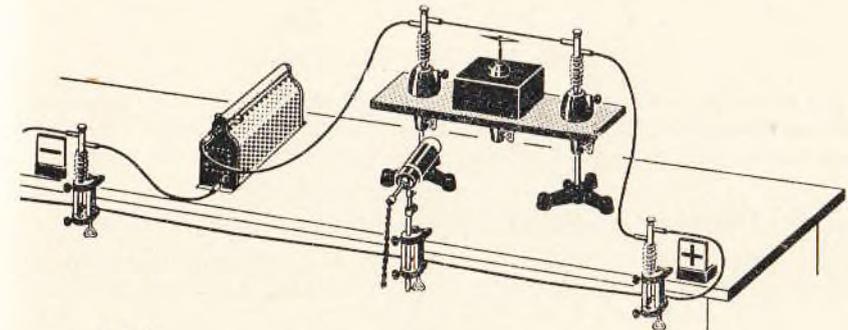
<sup>1)</sup> Karl Friedrich Gauß, deutscher Physiker, 1777—1855

<sup>2)</sup> James Maxwell, englischer Physiker, 1831—1879

## II. Der Elektromagnetismus

### 1. Das Magnetfeld eines Leiters

Ein Leitungsdraht wird nach Abb. 16 über einer Magnetnadel in Nord-Süd-Richtung, also in der gleichen Lage wie die Magnetnadel, angeordnet. Schließen wir nun kurzzeitig den Stromkreis, so stellen wir fest, daß die Magnetnadel aus ihrer Nord-Süd-Richtung abgelenkt wird. Das ist ein



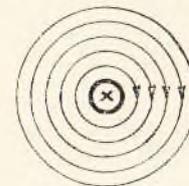
= 3-4 V

(Abb. 16)

Zeichen dafür, daß sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld bildet. Untersuchen wir das Feld um den Leiter herum mit der Magnetnadel, so stellen wir fest, daß das magnetische Feld den stromdurchflossenen Leiter ganz umhüllt, wie etwa ein Ring. Man spricht deshalb auch von einem Ringfeld. Blickt man bei der Untersuchung des Feldes in Richtung des fließenden Stromes auf die Nadel, so weicht ihr Nordpol stets nach rechts herum (im Uhrzeigersinn) ab.

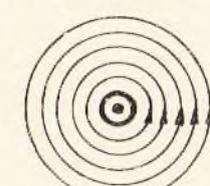
#### Kraftlinienrichtung eines stromdurchflossenen Leiters

bei Stromeintritt



(Abb. 17a)

bei Stromaustritt



(Abb. 17b)

Wir wollen uns vorstellen, daß der Strom sich wie ein Pfeil durch den Leiter bewegt. Wenn wir in seiner Bewegungsrichtung hinter dem Pfeil

berschauen, erscheint das Gefieder an seinem Ende in Form eines Kreuzes  $\otimes$ ; sehen wir dem Pfeil entgegen (kommt er also auf uns zu), so erkennen wir die Pfeilspitze in Form eines Punktes  $\odot$ .

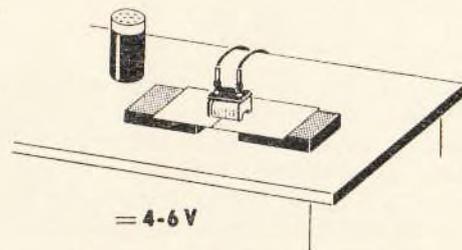
Wenn wir in die Richtung des fließenden Stromes sehen (hinter dem Pfeil her), so laufen die Kraftlinien des um den Leiter befindlichen Magnetfeldes rechts herum (im Uhrzeigersinn) (Abb. 17a). Sieht man gegen die Richtung des Stromes (dem Pfeil entgegen), so verlaufen die Kraftlinien des Feldes links herum (entgegen dem Uhrzeigersinn) (Abb. 17b).

## 2. Das Magnetfeld einer Spule

Wir haben im vorhergehenden Abschnitt das Magnetfeld eines einzelnen stromdurchflossenen Leiters untersucht. Was wird sich zeigen, wenn wir einen einzelnen längeren Leiter zu einer Spule aufwickeln?

### a) Der Verlauf der Kraftlinien

Wir streuen bei dem Versuch nach Abb. 18 Eisenfeilspäne auf ein Stück Karton, das in den freien Raum der Spule hineinragt. Nach dem Ein-



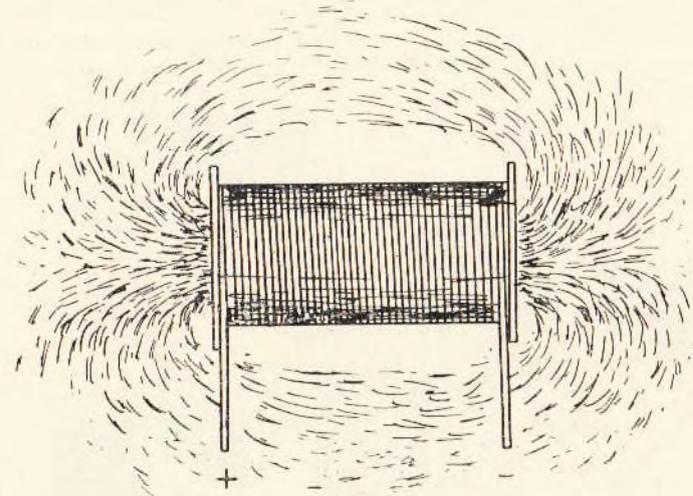
(Abb. 18)

schalten des Stromes erhalten wir ein magnetisches Feld nach dem Schema der Abb. 19. Untersuchen wir das magnetische Feld mit Hilfe einer Magnetnadel, so stellen wir am Anfang der Spule einen Südpol und am Ende der Spule einen Nordpol fest.

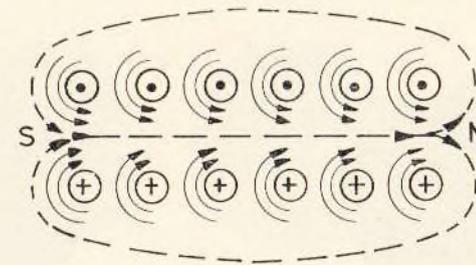
In Abb. 20 ist der Querschnitt der Spule schematisch dargestellt. Die Querschnittsfläche des Leiters ist als kleiner (etwas stärker ausgezogener) Kreis gezeichnet, in dem die Stromrichtung durch ein Kreuz  $\otimes$  oder einen Punkt  $\odot$  angegeben ist (siehe Abb. 17). Mit Hilfe der Stromrichtungsangabe können wir festlegen, in welcher Richtung die Kraftlinien des zu jedem Leiterabschnitt gehörigen magnetischen Feldes verlaufen. Die Kraftlinien der oberen Leiterquerschnittsflächen verlaufen links herum, die der unteren rechts herum. Im Innern der Spule verlaufen

alle Kraftlinien von links nach rechts. Wir erkennen, daß sich die Kraftlinien der Magnetfelder der einzelnen Leiterabschnitte im Innern der Spule summieren zu einem Gesamtkraftfeld der Spule, dessen Nord- und

### Kraftfeld einer stromdurchflossenen Spule



(Abb. 19)



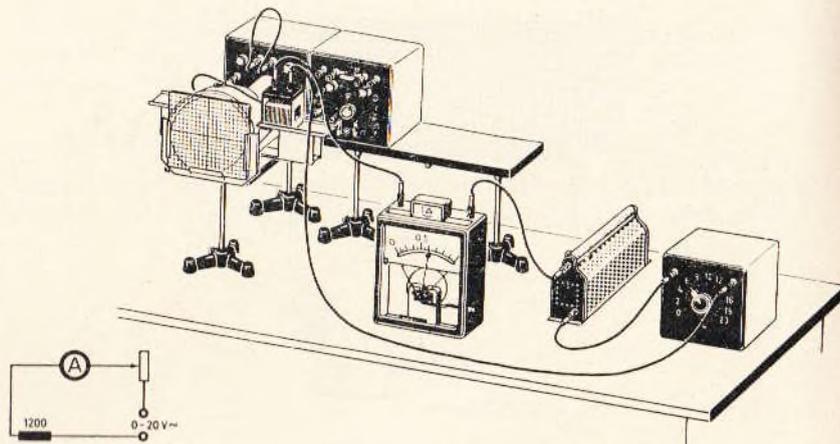
(Abb. 20)

Südpol durch die Kraftlinienrichtung der Einzelfelder gegeben ist. Ein einfaches Hilfsmittel zur Bestimmung der Richtung des Kraftlinienflusses einer Spule ist die **Rechte-Hand-Regel**:

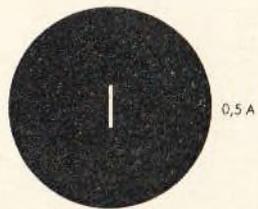
Wird eine Spule mit der rechten Hand derart umfaßt, daß die Fingerspitzen in die Stromrichtung weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung der Kraftlinien, den Nordpol, an.

### b) Die Stärke des Magnetfeldes

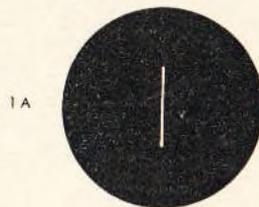
In den folgenden Versuchsaufbauten ist die Stärke des magnetischen Feldes einer Spule mit Hilfe eines Oszillographen untersucht worden. Ein Oszillograph ist eine Kathodenstrahlröhre, deren Aufbau und Arbeitsweise hier nicht näher erläutert werden soll; es genügt uns, zu wissen, daß bei den durchgeführten Untersuchungen der Kathodenstrahl wie eine Magnetnadel durch das magnetische Feld abgelenkt wird und daß die Höhe des Leuchtstriches ein Maß für die Stärke des magnetischen Feldes der Spule ist.



a)



b)



c)

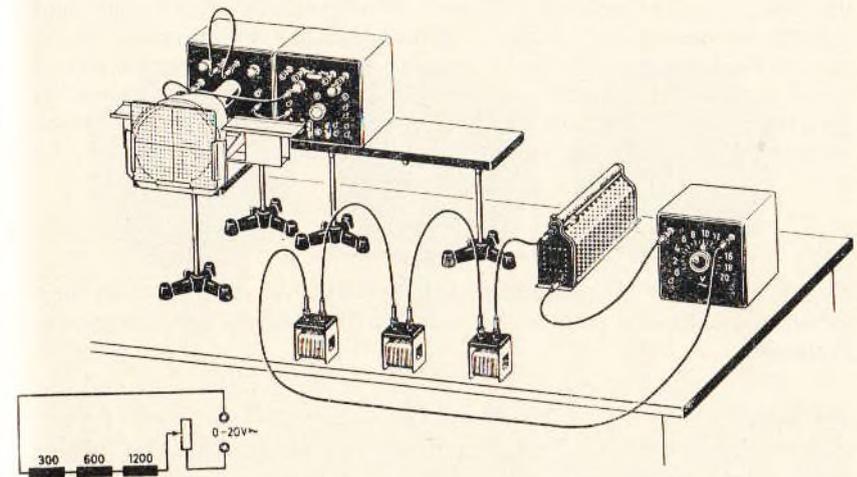
(Abb. 21)

Bei dem Versuch nach Abb. 21a wird eine Spule mit 1200 Windungen untersucht. Wird ein Strom von 0,5 A durch die Spule geschickt, so zeigt

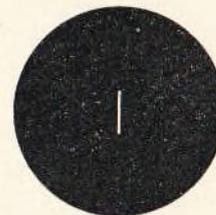
der Leuchtstrich eine Höhe nach Abb. 21b; bei Erhöhung der Stromstärke auf 1 A hat sich die Höhe des Leuchtstriches verdoppelt.

Wir erkennen:

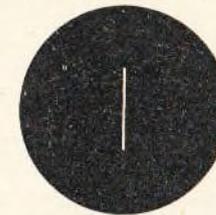
Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule wächst mit der Stromstärke.



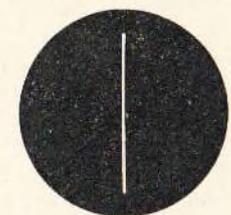
a)



b)



c)



d)

(Abb. 22)

Bei dem Versuch nach Abb. 22 fließt durch drei hintereinander geschaltete Spulen ein Strom, dessen Stärke während des Versuchs nicht verändert wird; alle drei Spulen (300, 600 und 1200 Windungen) werden also

bei gleicher Stromstärke untersucht. Dabei ergeben sich die Höhen des Leuchtstriches nach den Abb. 22b bis d.

Wir erkennen:

**Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule wächst mit der Windungszahl.**

An Hand der Versuche nach den Abb. 21 und 22 haben wir erkannt, daß die Stärke des Magnetfeldes oder auch die magnetische Kraft einer Spule mit der Stromstärke ( $I$ ) und der Windungszahl ( $N$ ) zunimmt. Da die magnetische Kraft abhängig ist von der Anzahl der Kraftlinien, die die Spule durchfluten, so gibt das **Produkt aus Stromstärke (Ampere) und Windungszahl** das **Maß der Durchflutung** an. Bezeichnet man die **Durchflutung** mit dem griechischen Buchstaben  $\Theta$  (theta), so ist:

$$\Theta = I \cdot N$$

Das Maß für die Durchflutung wird in Amperewindungen (Aw) angegeben. Deshalb sagt man auch statt Durchflutung oft nur **Amperewindungszahl**.

#### 1. Beispiel:

Wie groß ist die Durchflutung einer Spule mit 1200 Windungen bei einer Stromstärke von 0,5 Ampere?

Gegeben:  $N = 1200$        $I = 0,5 \text{ A}$

Gesucht:  $\Theta$

Lösung:  $\Theta = I \cdot N = 0,5 \cdot 1200 = 600 \text{ Aw}$

#### 2. Beispiel:

Wie groß ist bei der errechneten Durchflutung des 1. Beispiels der Strom, wenn die Spule nur 300 Windungen hat?

Gegeben:  $\Theta = 600 \text{ Aw}$        $N = 300 \text{ Wdgn}$

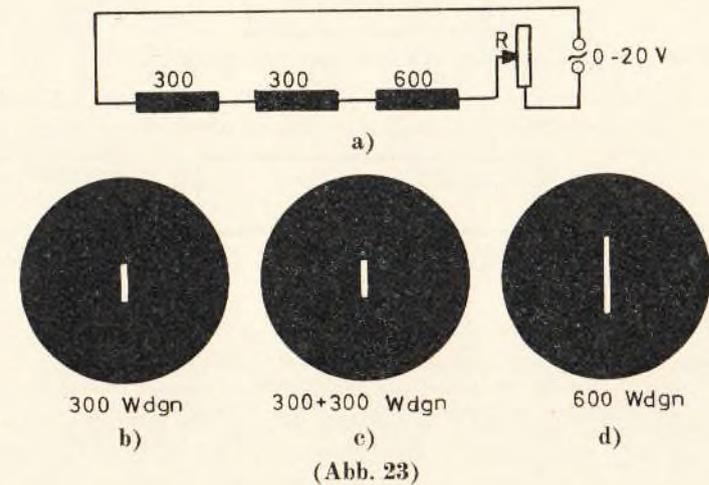
Gesucht:  $I$

Lösung: Aus der Grundformel erhalten wir nach Umstellung:

$$I = \frac{\Theta}{N} = \frac{600}{300} = 2 \text{ A}$$

Die Stärke des Magnetfeldes, kurz Feldstärke, einer stromdurchflossenen Spule ist außer vom Strom und von der Windungszahl auch noch von der **Länge der Spule abhängig**. Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie in Abb. 22; hier wollen wir jedoch zwei Spulen zu je 300 Wdgn mit einer Spule vergleichen, die 600 Wdgn hat (Schema des Versuchs in Abb. 23a). Die Spulenkörper aller drei Spulen haben gleiche Abmessungen. Zu Beginn des Versuchs wird eine Spule mit 300 Wdgn verwendet, wobei der

Leuchtstrich auf eine bestimmte Höhe eingeregelt wird (Abb. 23b). Jetzt werden die beiden Spulen zu je 300 Wdgn mit ihren Spulenkörpern ganz dicht hintereinander aufgestellt, so daß sich gegenüber dem ersten



Versuch eine Spule doppelter Länge ergibt; die Höhe des Leuchtstriches verändert sich kaum (Abb. 23c). Bei der Untersuchung der Spule mit 600 Wdgn zeigt der Leuchtstrich die doppelte Höhe gegenüber dem Versuch mit den zwei Spulen zu je 300 Wdgn (Abb. 23d). Bei einer Spule mit 1200 Wdgn würde der Leuchtstrich viermal so hoch sein wie bei einer Spule mit 300 Wdgn.

Wir erkennen:

**Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ist um so größer, je kürzer ihr Körper bei gleichem Strom und gleicher Windungszahl gehalten wird.**

Die Erkenntnisse aus den Versuchen nach Abb. 21 bis 23 werden zusammengefaßt:

**Die Feldstärke  $H$  einer stromdurchflossenen Spule ist gleich dem Produkt aus der Stromstärke  $I$  und der Windungszahl  $N$  geteilt durch die Spulenlänge  $l$  in cm. Die Maßeinheit ist Amperewindungen je cm (Aw/cm).**

In eine Formel gebracht ist

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

Vergleichen wir die Kraftliniendichte  $B$  aus dem Abschnitt A I 3 c mit der Feldstärke  $H$ , so ergibt sich die Beziehung

$$B = 1,256 \cdot H$$

Wird  $H$  in Aw/cm eingesetzt, erhalten wir  $B$  in Gauß.

Setzen wir den Wert für  $B$  in die Formel für den magnetischen Kraftfluß ein, so erhalten wir den Kraftfluß einer stromdurchflossenen Spule:

$$\Phi = 1,256 \cdot H \cdot A$$

Wir erhalten  $\Phi$  in Maxwell, wenn wir  $H$  in Aw/cm und  $A$  in  $\text{cm}^2$  einsetzen.

**Beispiel:**

Eine Spule hat auf einer Länge von 4 cm 1200 Windungen, sie wird von einem Strom  $I = 2$  A durchflossen. Der Querschnitt der Spule beträgt  $16 \text{ cm}^2$ . Wie groß sind die Feldstärke und der magnetische Kraftfluß der Spule?

**Gegeben:**  $N = 1200$      $l = 4 \text{ cm}$      $I = 2 \text{ A}$      $A = 16 \text{ cm}^2$

**Gesucht:**  $H$      $\Phi$

**Lösung:**  $H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{2 \cdot 1200}{4} = 600 \text{ Aw/cm}$

Bevor wir  $\Phi$  errechnen können, müssen wir erst  $B$  ausrechnen; es ergibt sich aus der Formel

$$B = 1,256 \cdot H = 1,256 \cdot 600 = 754 \text{ Gauß}$$

Wir setzen  $B$  in die Formel für den Kraftfluß ein

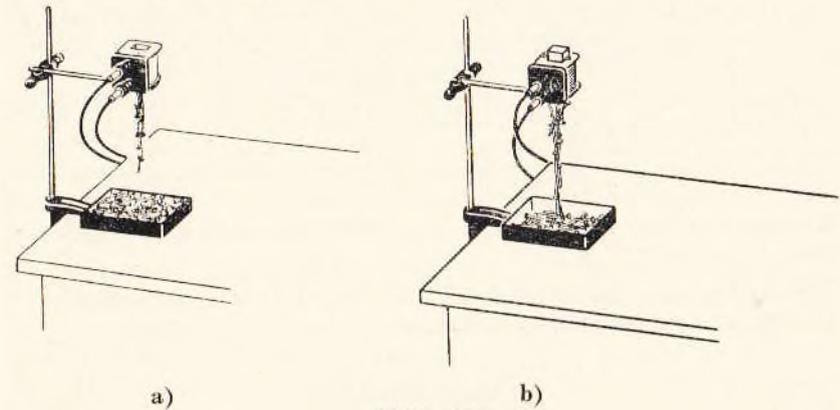
$$\Phi = B \cdot A = 754 \cdot 16 = 12064 \text{ Maxwell}$$

### 3. Die Spule mit Eisenkern

#### a) Die magnetische Leitfähigkeit

Wir haben im Abschnitt A I 3 b festgestellt, daß weiches Eisen die magnetischen Kraftlinien besser leitet als die Luft. Wenn wir also in das Innere einer Spule einen Eisenkern hineinbringen, müßte das magnetische Feld und damit auch der Kraftfluß größer werden. Nach Abb. 24a werden wir zunächst einer eisenfreien Spule eine Anzahl Eisennägel nähern. Die Nägel werden zum Teil in die Spule hineingezogen oder haften aneinander, sobald der Strom eingeschaltet wird. Bei Unterbrechung des Stromzuflusses fallen alle Nägel wieder zurück. Nach Abb. 24b bringen wir jetzt in das Spulenninnere einen Eisenkern. Es werden jetzt sehr viel mehr Nägel angezogen und festgehalten. Erhöhen wir die Stromstärke, wird die magnetische Kraft noch zunehmen, bis wie bei einem Dauermagneten auch hier eine **Sättigung** eingetreten ist. Nach dem Abschalten des Stromes fällt die Mehrzahl der Nägel ab. Ein kleiner Teil jedoch bleibt

hängen. Im Eisen bleibt also ein Restmagnetismus, **Remanenz**, zurück (siehe Abschnitt A I 3 c).



(Abb. 24)

Der Grund für den größeren magnetischen Kraftfluß bei einer Spule mit Eisenkern liegt in der besseren magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität) des Eisens gegenüber Luft (im Abschnitt A I 3 b haben wir es Durchlässigkeit genannt). Die magnetische Leitfähigkeit hängt ausschließlich von der Legierung des Eisenkerns ab, der in die Spule eingebracht wird.

Der Kraftfluß  $\Phi$  der Spule mit Eisenkern wird errechnet, indem man den Kraftfluß der eisenlosen Spule mit der Permeabilität  $\mu$  des Eisenkerns multipliziert:

$$\Phi = \Phi_{\text{Luft}} \cdot \mu \quad \text{oder} \\ \Phi = 1,256 \cdot \mu \cdot H \cdot A$$

wobei  $H$  in Aw/cm und  $A$  in  $\text{cm}^2$  eingesetzt werden.

**Beispiel:**

Eine Spule mit 1200 Windungen hat einen geschlossenen Eisenkern von 36 cm Länge und  $25 \text{ cm}^2$  Querschnitt; er besteht aus Dynamoblech mit  $\mu = 200$ . Durch die Spule fließt ein Strom von 600 mA. Wie groß ist der magnetische Kraftfluß a) ohne Eisenkern b) mit Eisenkern?

**Gegeben:**  $N = 1200$      $l = 36 \text{ cm}$      $A = 25 \text{ cm}^2$   
 $\mu = 200$      $I = 0,6 \text{ A}$

**Gesucht:**  $\Phi_{\text{Luft}}$      $\Phi_{\text{Fe}}$

**Lösung:** Wir setzen nacheinander die gegebenen Werte in die uns bekannten Formeln ein:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{0,6 \cdot 1200}{36} = 20 \text{ Aw/cm}$$

$$B = 1,256 \cdot H = 1,256 \cdot 20 = 25,12 \text{ Gauß}$$

$$\text{Zu a) } \Phi_{\text{Luft}} = B \cdot A = 25,12 \cdot 25 = 579 \text{ Maxwell}$$

$$\text{Zu b) } \Phi_{\text{Eisen}} = \mu \cdot \Phi_{\text{Luft}} = 200 \cdot 579 = 115\,800 \text{ Maxwell}$$

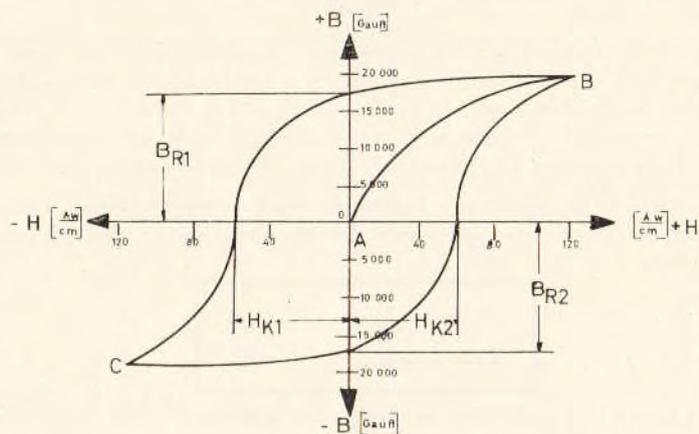
### b) Die Ummagnetisierungsvorgänge

Wir haben festgestellt, daß nach Unterbrechung des Stromdurchflusses durch die Spule im Eisenkern ein Restmagnetismus (Remanenz) zurückbleibt. Diese **Remanenz ist unerwünscht**. Um sie zu beseitigen, ist eine Feldstärke erforderlich, die der ursprünglichen Magnetfeldstärke entgegenwirkt. Diese durch Änderung der Stromrichtung bewirkte Feldstärke heißt **Koerzitivfeldstärke**.

Der Verlauf der sich wiederholenden Vorgänge beim Magnetisieren und beim Beseitigen der Remanenz kann man aus einer Kurve ablesen, die **Hysteresisschleife** genannt wird (hysteresis ist griechisch und heißt „Zurückbleiben“).

Wir wollen nach der in Abb. 25 dargestellten Hysteresisschleife die **Ummagnetisierungsvorgänge** verfolgen.

Die Hysteresisschleife



(Abb. 25)

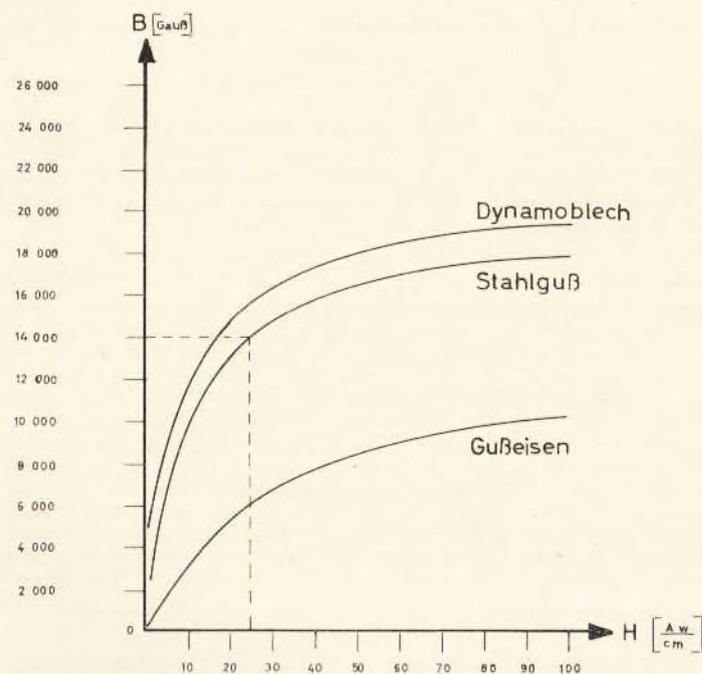
Beim Punkt A der Kurve ist das Eisen noch völlig unmagnetisch. Mit dem Ansteigen der Feldstärke  $H$  wird auch die Kraftliniendichte  $B$  (auch magnetische Induktion) größer, bis im Punkt B die Sättigung erreicht ist. Wird jetzt der elektrische Strom in der Spule unterbrochen, sinkt der Wert für die Feldstärke auf Null; der Wert für die Kraftliniendichte geht jedoch nicht auf Null zurück, sondern behält einen dem Restmagnetismus entsprechenden Wert von  $B_{R1}$ . Wenn dieser Wert aufgehoben werden soll, wird eine entgegengesetzte Feldstärke (Koerzitivfeldstärke)  $H_{K1}$  erforderlich (im linken unteren Teil der Kurve). Erhöht man dabei den Strom noch weiter, so erhält man im Punkt C erneut eine

Sättigung, allerdings mit entgegengesetzter Polarität. Wird der Wert für die Feldstärke wieder verringert, ergibt sich infolge der Remanenz der Wert  $B_{R2}$ , zu dessen Aufhebung die Koerzitivfeldstärke  $H_{K2}$  erforderlich ist. Bei weiterem Stromanstieg in der neuen Richtung erreicht die magnetische Induktion wiederum ihre Sättigung im Punkt B. Das Kurvenstück A bis B wird nicht wieder erreicht, weil es nur für neuen, also noch unmagnetischen, Werkstoff charakteristisch ist. Man nennt deshalb auch das Kurvenstück A bis B der Hysteresisschleife **Neukurve**.

### c) Magnetisierungskurven

Die Hysteresisschleife zeigt uns, daß zu jeder Feldstärke in A/cm ein bestimmter Wert für die magnetische Induktion in Gauß gehört. Die Größe dieser magnetischen Induktion ist abhängig von der Permeabilität des jeweiligen Stoffes. Man kann also nicht wie bei Luft  $\mu = 1$  setzen. Deshalb rechnet man in der Praxis nicht mit  $\mu$ , sondern mit dem Verhält-

Magnetisierungskurven



(Abb. 26)

nis der magnetischen Induktion zur Feldstärke und hat für jeden Stoff eine **Magnetisierungskurve** festgelegt (Abb. 26). Wir sehen bei der Magnetisierungskurve nach Abb. 26 die in der Senkrechten aufgetragenen Werte für die magnetische Induktion  $B$  in Gauß und die in der Waagerechten aufgetragenen Werte für die Feldstärke  $H$  in Aw/cm. In der Praxis ist für  $B$  stets von vornherein ein bestimmter Wert festgelegt, für den der zugehörige Wert für  $H$  sofort aus der Kurve abgelesen werden kann.

### 1. Beispiel:

Die magnetische Induktion eines Elektromagneten soll 14 000 Gauß betragen. Als Werkstoff soll Stahlguß verwendet werden. Welche Windungszahl muß für die Spule gewählt werden, wenn ihr Kern 8 cm lang sein soll und der höchstzulässige Strom 500 Milliampere nicht überschreiten soll?

**Gegeben:**  $B = 14\,000$  Gauß       $I = 0,5$  A       $l = 8$  cm

**Gesucht:**  $N$

**Lösung:** Auf der Senkrechten der Magnetisierungskurve nach Abb. 26 suchen wir die Zahl 14 000 Gauß, in diesem Abstand zur Waagerechten gehen wir nach rechts bis zum Schnittpunkt mit der Kurve für Stahlguß. Von diesem Schnittpunkt fallen wir das Lot auf die Waagerechte und lesen dort den Wert 25 Aw/cm für die Feldstärke ab.

Nun stellen wir die Formel  $H = \frac{I \cdot N}{l}$  nach  $N$  um und erhalten

$$N = \frac{H \cdot l}{I} = \frac{25 \cdot 8}{0,5} = 400 \text{ Windungen}$$

### 2. Beispiel:

Wie groß ist der Kraftfluß des Elektromagneten im 1. Beispiel, wenn der Spulenkern einen Durchmesser von 2,8 cm hat?

**Gegeben:**  $B = 14\,000$  Gauß       $d = 2,8$  cm

**Gesucht:**  $\Phi$

**Lösung:** Wir bedienen uns der Formel  $\Phi = B \cdot A$

Zunächst jedoch müssen wir  $A$  errechnen:

$$A = r^2 \cdot \pi = 1,4^2 \cdot 3,14 = \text{rd. } 6 \text{ cm}^2$$

Den Wert für  $A$  setzen wir in die Formel ein:

$$\Phi = B \cdot A = 14\,000 \cdot 6 = 84\,000 \text{ Maxwell}$$

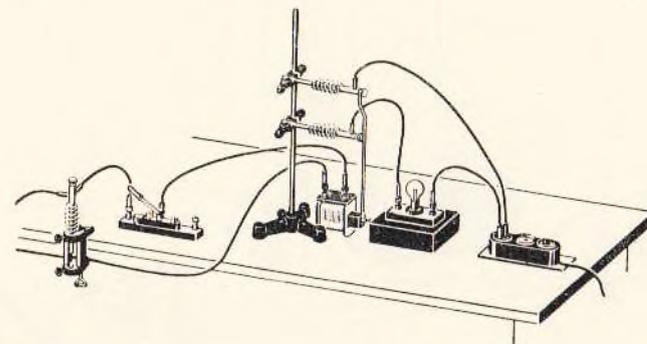
## 4. Anwendungsbeispiele

Die Erkenntnisse über den Elektromagnetismus hat man sich in der Technik zunutze gemacht. Geräten, die auf dieser Wirkungsweise aufgebaut sind, begegnen wir täglich. In diesem Abschnitt sollen die drei wichtigsten behandelt werden.

### a) Das Relais

Der Versuchsaufbau nach Abb. 27 zeigt die Wirkungsweise eines Relais. Und zwar soll hier gezeigt werden, wie man mit Hilfe von Schwachstrom einen Starkstrom ein- oder ausschalten kann. Wenn der Spulenstromkreis geschlossen wird, zieht

der Elektromagnet einen Anker an, dessen Kontaktfeder den Starkstromkreis schließt. Dadurch wird die aus dem Netz (Starkstromkreis) gespeiste Glühlampe zum Leuchten gebracht. Der Schwachstrom muß gerade so groß sein, daß die Kraftwirkung des Elektromagneten groß genug ist, einen sicheren Kontaktschluß zu gewährleisten. Beim Ausschalten des Schwachstromkreises erlischt die Glühlampe wieder.



$$= 6-8 \text{ V} \\ \approx 220 \text{ V}$$

(Abb. 27)

Relais, die statt des Eisenkerns einen Dauermagneten haben, nennt man **gepolte Relais**. Während die ungepolten Relais stromrichtungsunempfindlich sind, können gepolte Relais auch in Stromkreisen verwendet werden, in denen die Stromrichtung ständig wechselt.

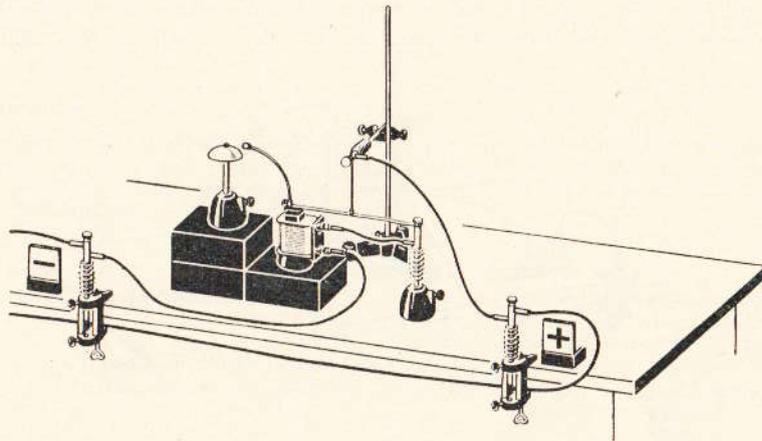
### b) Der Wecker

Der Aufbau dieses Versuchs ist dem nach Abb. 27 ähnlich. Die Abb. 28 zeigt in einfacher Weise den Aufbau eines Weckers. Über dem Eisenkern einer Spule ist ein Anker in der Art angebracht, daß er von dem Elektromagneten angezogen wird, sobald der Stromkreis von Hand geschlossen wird. Dabei wird ein Klöppel betätigt, der gegen eine Glockenschale schlägt. Sobald der Anker angezogen ist, öffnet eine an ihm befestigte Feder durch Abheben von einem Kontakt den Stromkreis wieder. Dadurch fällt der Anker in seine Ruhelage zurück und drückt dabei die Feder wieder gegen den Kontakt, wodurch der Stromkreis erneut geschlossen wird. Das Spiel beginnt wieder von vorn, der Elektromagnet zieht den Anker an, der Klöppel schlägt gegen die Glockenschale, die Feder hebt vom Kontakt ab usw. Die Vorgänge wiederholen sich so schnell, daß der Wecker ein rasselndes Geräusch verursacht, das erst endet, wenn der Stromkreis von Hand wieder ausgeschaltet wird.

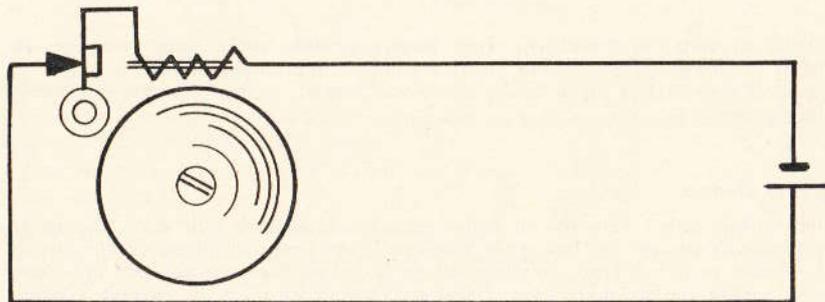
Ein Wecker mit einem Aufbau nach Abb. 28 ist ein **Gleichstromwecker**, bei dem die Stromrichtung immer ein- und dieselbe ist. Die Abb. 29 zeigt uns das Schema eines **Wechselstromweckers** mit polarisierten Magneten (Dauermagneten). Auf dem Nordpol eines Dauermagneten ist der Anker drehbar befestigt; auf dem Südpol sind die Eisenkerne angebracht, auf denen die Spulen sitzen. Fließt nun durch die

Spulen ein Wechselstrom (siehe unter B I), der ständig seine Stromrichtung ändert, so wird je nach der Flußrichtung dieses Stromes entweder das Magnetfeld in dem linken Spulenkern verstärkt und im rechten Kern geschwächt oder umgekehrt.

### Elektrischer Wecker



= 3-4 V



(Abb. 28)

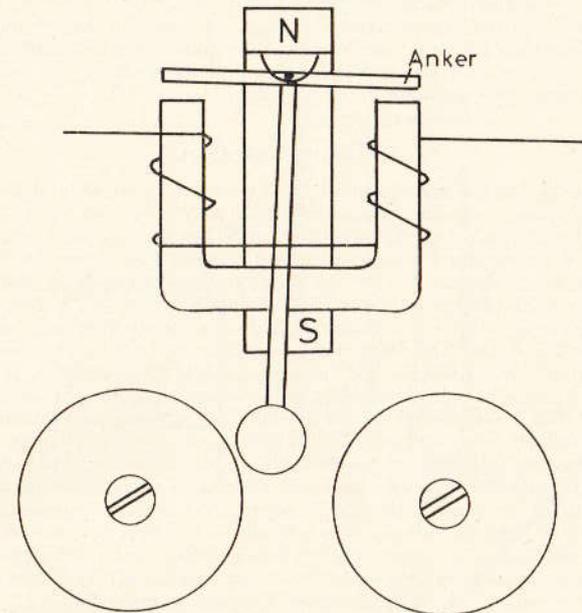
Der Anker wird dadurch im Rhythmus der Richtungswechsel des Stromes nach links und nach rechts kippen und den Wecker zum Klingen bringen. Wechselstromwecker dieser Art haben keine Kontakte.

### c) Der Fernhörer

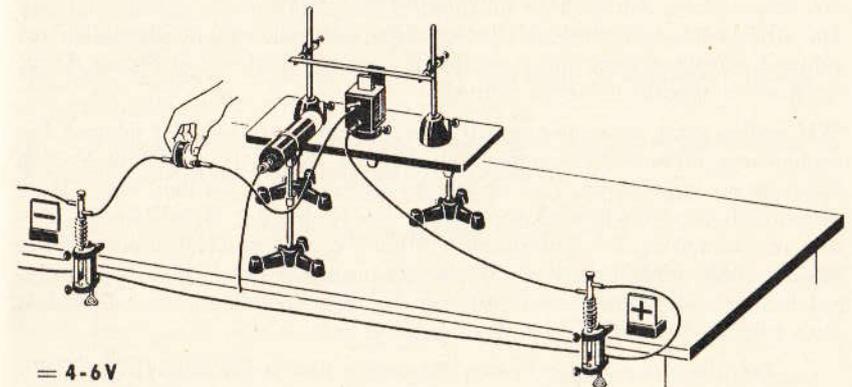
Die Versuchsanordnung nach Abb. 30 zeigt uns einen Fernsprechapparat, bei dem jedoch hier nur die Wirkungsweise des Fernhörers demonstriert werden soll.

Über dem Dauermagneten ist eine Blattfeder so angeordnet, daß sie gerade nicht mehr vom Magneten angezogen wird. In den Spulenstromkreis ist eine Büchse mit

### Gepolter Wechselstromwecker



(Abb. 29)



= 4-6 V

(Abb. 30)

Kohlekörnern (Mikrophon) eingeschaltet. Durch Drücken auf diese Büchse verlagern sich die Kohlekörner und bewirken dadurch eine ständige Widerstandsänderung, die wiederum eine Änderung der Stromstärke zur Folge hat. Diese Stromschwankungen bedingen Magnetfeldänderungen im Elektromagneten, wodurch die Blattfeder im Rhythmus dieser Änderungen angezogen oder abgestoßen wird. Der Fernhörer überträgt also die von einem Mikrophon (hier Büchse) ausgehenden Stromschwankungen in Luftdruckänderungen (Schallwellen), die beim Fernsprechen von unserem Ohr wahrgenommen werden.

### 5. Übungsaufgaben

a) Wie heißt die Rechte-Hand-Regel? b) Von welchen Größen ist die Stärke des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule abhängig? c) Was versteht man unter einer Durchflutung? d) Erkläre die Begriffe Sättigung, Remanenz und Permeabilität! e) Was ist eine Hysteresisschleife? f) Ein Relais hat 2400 Windungen und wird von einem Strom  $I = 30 \text{ mA}$  durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke? g) Ein Relais soll mit einer Feldstärke von  $H = 300 \text{ Aw/cm}$  und einem Strom von  $I = 0,04 \text{ A}$  arbeiten. Wie groß muß die Windungszahl bemessen werden? h) Ein Relais hat 4000 Windungen und arbeitet mit einer Feldstärke von  $240 \text{ Aw/cm}$ . Wie groß ist die höchstzulässige Stromstärke? i) Eine Spule mit 900 Windungen hat einen in sich geschlossenen Eisenkern, dessen Querschnitt  $8 \times 3 \text{ cm}$  ist und dessen Länge  $25 \text{ cm}$  beträgt. Der Kern ist aus Dynamoblech mit einer Permeabilität  $\mu = 400$  hergestellt. Die Spule wird von einem Strom  $I = 0,5 \text{ A}$  durchflossen. Wie groß ist der Kraftfluß ohne Eisenkern und mit Eisenkern? k) Ein Elektromagnet soll eine magnetische Induktion von  $12\,000 \text{ Gauß}$  entwickeln. Es wird Stahlguß verwendet. Welche Windungszahl muß die Spule erhalten, wenn ein Strom von  $3 \text{ Ampere}$  zulässig sein soll und die in sich geschlossene Länge des Spulenkerns auf  $33 \text{ cm}$  bemessen wurde? Wie groß ist der Kraftfluß des Magneten, wenn der Kern einen Querschnitt von  $4 \times 4 \text{ cm}$  haben soll? l) Erkläre den Unterschied zwischen einem Gleich- und einem Wechselstromwecker!

## III. Die Fremdinduktion

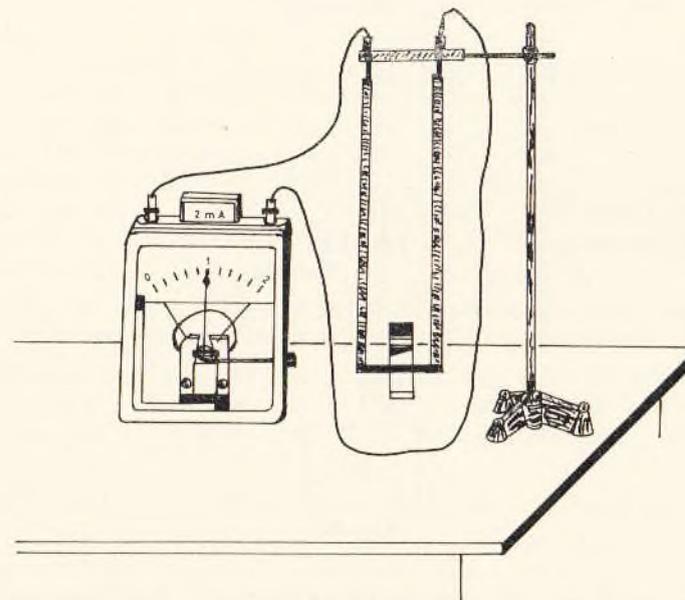
### 1. Der Leiter im Magnetfeld

Im Abschnitt A II haben wir bei den Untersuchungen des Elektromagnetismus gesehen, daß sich überall, wo ein elektrischer Strom fließt, auch ein magnetisches Feld bildet.

Wir wollen jetzt untersuchen, ob dieser Vorgang umkehrbar ist und bedienen uns dabei des Versuchs nach Abb. 31. Ein Leiter wird an Metallbändern so aufgehängt, daß er frei zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten schwingen kann. Die freien Enden der Metallbänder werden mit einem Milliampereometer verbunden, dessen Nullpunkt auf die Skalenmitte eingeregelt wird. Wir setzen nun den Leiter in Schwingung, so daß er das homogene Kraftfeld des Hufeisenmagneten schneidet. Dabei beobachten wir folgenden Vorgang:

Schwingt der Leiter in den Magneten hinein, so schlägt das Milliampereometer nach rechts aus, schwingt der Leiter aus dem Magneten heraus, schlägt das Instrument nach links aus.

Jetzt wollen wir den Leiter stillstehen lassen und stattdessen den Hufeisenmagneten ruckweise über den Leiter hin- und herbewegen. Die Ausschläge an dem Meßinstrument sind die gleichen wie beim Schwingen des Leiters.



(Abb. 31)

Wir haben also festgestellt, daß ein Strom entsteht, wenn ein Leiter von den Kraftlinien eines Magneten geschnitten wird, wobei es unwesentlich ist, ob sich der Leiter oder das Kraftfeld des Magneten bewegen.

Da die Ursache des Stromes eine im Leiter erregte (induzierte) Spannung sein muß, gilt die Regel:

**Wird ein Leiter von den Kraftlinien eines Magneten geschnitten, so entsteht in ihm eine Induktionsspannung.**

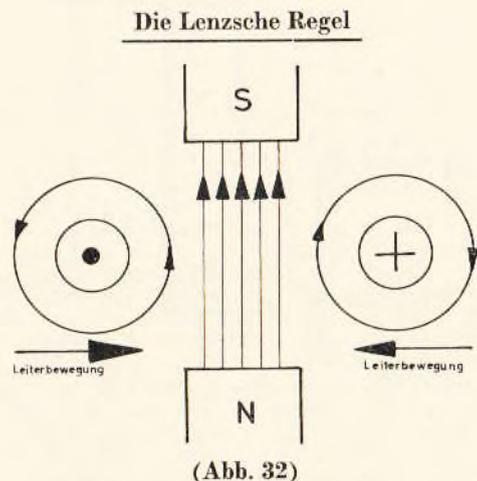
### 2. Der Induktionsstrom

Wir haben bei dem Versuch nach Abb. 31 gesehen, daß das Milliampereometer je nach der Bewegungsrichtung des schwingenden Leiters (in den Magneten hinein und wieder heraus) nach rechts oder nach links ausschlug. Daraus folgte:

**Die Richtung des Induktionsstromes ist abhängig von der Richtung, in der die Kraftlinien geschnitten werden.**

### a) Die Lenzsche Regel

Wir wollen den Versuch nach Abb. 31 noch einmal wiederholen. Wenn wir den schwingenden Leiter genau betrachten, stellen wir fest, daß er beim Durchgang durch das Kraftfeld des Magneten leicht abgebremst wird. Wodurch entsteht diese Abbremsung?



Schwingt der Leiter von rechts her in das Magnetfeld des Dauermagneten ein, so wird in ihm eine Spannung induziert, die wiederum einen Induktionsstrom bewirkt. Dieser Strom baut um den Leiter herum ein eigenes Feld auf, das durch seine Richtung das Feld des Magneten noch verstärkt. Dadurch wird der Leiter aus dem Kraftfeld herausgedrängt (in diesem Falle wird die Schwingkraft des angestoßenen Leiters leicht abgebremst). Der gleiche Vorgang wiederholt sich, wenn der Leiter von links her beim Herausschwingen aus dem Dauermagneten in dessen Feld eintritt.

Wenn wir nun die Richtung des induzierten Stromes bestimmen wollen, bedienen wir uns der bereits im Abschnitt A II 2 b erwähnten Rechten-Hand-Regel hier sinngemäß:

■ Läßt man die Kraftlinien des Magnetfeldes vom Nordpol zum Südpol in den offenen Handteller der rechten Hand eintreten, während der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters angibt, so zeigen die Fingerspitzen in die Richtung des induzierten Stromes.

Wird statt des Leiters das Kraftfeld bewegt, so ergibt sich die gleiche Wirkung, als wenn der Leiter in entgegengesetzter Richtung bewegt würde.

Unsere Feststellungen finden ihre Bestätigung in der **Lenzschen Regel**:

■ **Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er seinen Entstehungsvorgang zu hemmen sucht.**

### 3. Die Induktionsspannung

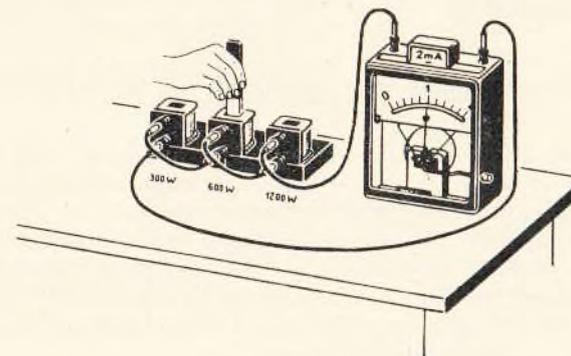
Wir wollen uns nochmals mit dem Versuch nach Abb. 31 befassen. Der Leiter soll diesmal ruhig hängen bleiben; den Hufeisenmagneten bewegen wir so, daß sein Kraftfeld den Leiter schneidet. Daß Meßinstrument beweist, daß auch auf diese Weise im Leiterkreis ein Strom induziert wird. Jetzt soll der Hufeisenmagnet nur so weit bewegt werden, daß der Leiter im magnetischen Kraftfeld verbleibt. Da das Feld nicht überall gleichmäßig stark ist (an den Enden schwächer als in der Mitte), wird der Leiter bei der Bewegung des Magneten ständig von einem veränderten Feld geschnitten. Es gilt die Regel:

■ **In einem Leiter wird eine Induktionsspannung erzeugt, wenn sich das magnetische Kraftfeld, in dem er sich befindet, ändert.**

Die Veränderung des Kraftfeldes kann sowohl durch Veränderung des Kraftflusses des Magneten hervorgerufen werden, als auch dadurch, daß der Leiter sich bei konstantem Kraftfluß durch das Kraftfeld bewegt.

### a) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Windungszahl

Bei dem Versuch nach Abb. 33 werden drei Spulen hintereinander geschaltet (300, 600 und 1200 Windungen). Der Anfang der ersten Spule und das Ende der dritten Spule werden an ein Milliampereometer herange-



(Abb. 33)

führt. Nun läßt man einen Stabmagneten (natürlich immer mit dem gleichen Pol nach unten) nacheinander in die drei Spulen hineinfällen.

Das Meßinstrument zeigt für die Spule mit 300 Windungen einen Wert von etwa 0,2 mA an, bei 600 Windungen einen solchen von etwa 0,4 mA und bei 1200 Windungen etwa 0,8 mA. Da der Widerstand des Stromkreises bei allen drei Fällen der gleiche ist, gibt uns der Ausschlag des Meßinstruments einen direkten Aufschluß über die Höhe des fließenden Stromes. **Der angezeigte Strom aber ist allein von der Höhe der induzierten Spannung abhängig.** Es gilt also das Gesetz:

**Die Induktionsspannung  $E$  wächst mit der Länge  $l$  des Leiters bzw. mit der Windungszahl.**

Eine Spule besteht aus einem mehr oder weniger langen Leiter, der auf einen Spulenkörper aufgewickelt ist. Sind nun die Windungszahl der Spule und der Durchmesser einer mittleren Windung dieser Spule (Durchmesser einer mitten in dem Paket liegenden einzelnen Windung) bekannt, kann man die aufgewickelte gesamte Länge des Leiters berechnen, indem man den Umfang dieser mittleren Windung ( $U = d \cdot \pi$ ) mit der Windungszahl der Spule multipliziert.

#### b) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Kraftfeldänderung

Wir wollen nun den Stabmagneten in die Spule mit den 1200 Windungen (Abb. 33) einmal langsam eintauchen und einmal schnell hineinfallen lassen. Beim langsamen Eintauchen wird das Meßinstrument etwa 0,2 mA und beim Hineinfallen wie beim vorhergehenden Versuch etwa 0,8 mA anzeigen.

Wir erkennen:

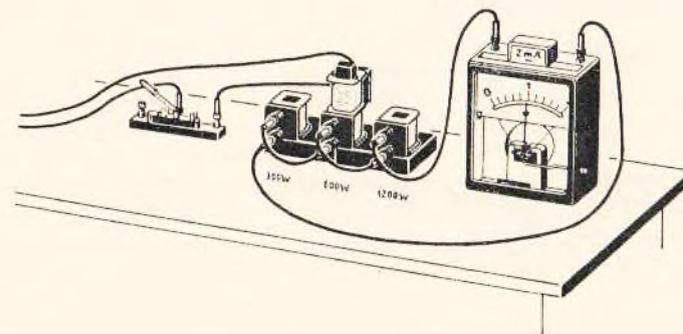
**Die Induktionsspannung  $E$  wächst mit der Geschwindigkeit  $v$  der Kraftfeldänderung.**

#### c) Die Induktionsspannung in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion

Wir ändern den Versuchsaufbau der Abb. 33 nach der in Abb. 34 dargestellten Form ab, indem wir statt des Dauermagneten (Stabmagneten) einen Elektromagneten verwenden, dessen magnetische Induktion  $B$  (auch Kraftflußdichte) wir durch den Strom einer verstellbaren Spannungsquelle verändern können. Es genügt, wenn der Versuch an nur einer Spule ausgeführt wird, wir wählen die Spule mit 600 Windungen. Der Eisenkern des Elektromagneten ragt mit seinem freien Ende in den Hohlraum der zu untersuchenden Spule.

Die Kraftfeldänderung erreichen wir durch Ein- und Ausschalten des Elektromagnetstromkreises. Das Meßgerät beobachten wir jeweils beim Einschalten des Stromkreises, also beim Aufbau des magnetischen Kraftfeldes.

Regeln wir die Spannungsquelle auf 2 Volt ein, ist also der Strom klein und damit die magnetische Induktion gering, so zeigt das Instrument etwa 1 mA an; regeln wir dagegen die Spannung auf 12 Volt ein, ist also der Strom groß und die magnetische Induktion ebenfalls groß, zeigt das Instrument etwa 30 mA an.



(Abb. 34)

Da der Ausschlag des Meßinstruments auch hier ein direktes Maß für die Größe der erzeugten Induktionsspannung ist, gilt:

**Die Induktionsspannung  $E$  wächst mit der magnetischen Induktion  $B$ .**

Fassen wir unsere Erkenntnisse noch einmal zusammen:

**Die Induktionsspannung  $E$  ist um so größer, je größer die Leiterlänge  $l$  ist, je größer die Geschwindigkeit  $v$  der Kraftfeldänderung ist, je größer die magnetische Induktion  $B$  ist.**

In Buchstaben ausgedrückt, heißt das:

$$E = \frac{B \cdot l \cdot v}{100000000} \text{ Volt}$$

Die Maßeinheit für die magnetische Induktion ist 1 Gauß. Im Abschnitt A 13 e ist bereits festgestellt worden, daß die magnetische Induktion von 1 Gauß einer Kraftlinie je  $\text{cm}^2$  Austrittsfläche entspricht. Nun ist aber auch

$$1 \text{ Gauß} = \frac{1 \text{ Vs}}{100000000 \cdot \text{cm}^2}$$

d. h. 1 Voltsekunde geteilt durch  $10^8$  mal  $1 \text{ cm}^2$ . Wenn wir in die obige Formel statt der Buchstabenbezeichnungen die Maßeinheiten einsetzen,

werden wir verstehen, weshalb das Produkt  $B \cdot l \cdot v$  durch 100 000 000 geteilt werden muß. Wir setzen also ein

$$\text{für } B = \frac{1 \text{ Voltsekunde}}{100\,000\,000 \cdot \text{cm}^2} \text{ für } l = \text{cm} \text{ und für } v = \frac{\text{cm}}{\text{sec.}}$$

$$E = \frac{\text{Voltsec} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}}{100\,000\,000 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sec}}, \text{ nachdem wir gekürzt haben,}$$

bleibt übrig  $\frac{\text{Volt}}{100\,000\,000}$

#### Beispiel:

Ein Leiter wird mit seiner ganzen Länge<sup>1)</sup> von 20 cm durch ein Kraftfeld von 12 000 Gauß bewegt. Die Geschwindigkeit des Leiters beträgt 15 m/sec.

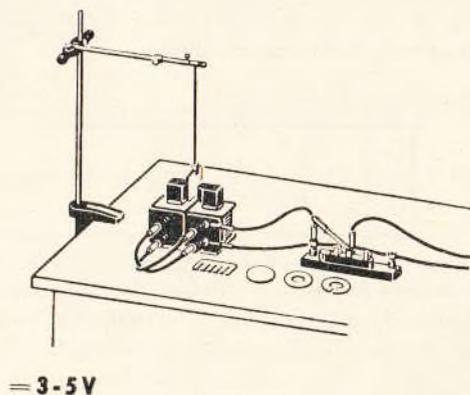
Gegeben:  $B = 12\,000 \text{ Gauß}$        $l = 20 \text{ cm}$   
 $v = 15 \text{ m/sec} = 1500 \text{ cm/sec}$

Gesucht:  $E$

Lösung:  $E = \frac{B \cdot l \cdot v}{100\,000\,000} = \frac{12\,000 \cdot 20 \cdot 1500}{100\,000\,000} = \frac{360}{100} = 3,6 \text{ Volt}$

#### 4. Wirbelströme

Wir wollen einen Versuch nach Abb. 35 durchführen. Die Spulen der beiden Elektromagnete werden so geschaltet, daß sich ihre magnetischen Kraftfelder addieren. In dieses starke Kraftfeld lassen wir einen Pendel-



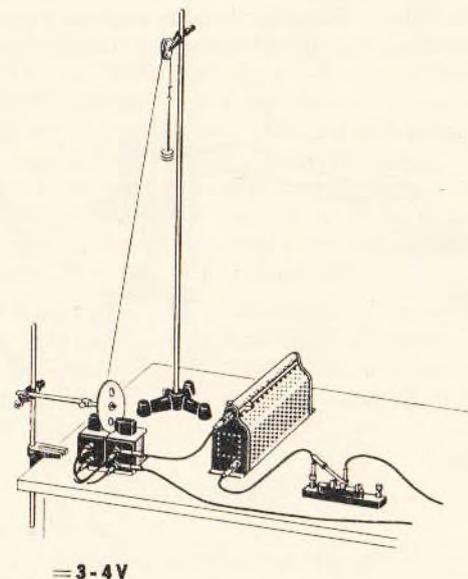
(Abb. 35)

<sup>1)</sup> Als Leiterlänge  $l$  darf nur die Länge des Leiters berücksichtigt werden, die in das Kraftfeld eintritt. Längenteile, die nicht eintreten, bewirken auch keine Spannungserzeugung und dürfen nicht mit angesetzt werden.

körper aus Aluminium hineinschwingen. Zuerst lassen wir eine volle rechteckige Scheibe, ohne den Stromkreis zu schließen, zwischen den Polen des Magneten hindurchschwingen. Nun schließen wir den Schalter und beobachten, daß das Pendel beim Eintreten in das Magnetfeld stark abgebremst wird und fast sofort stillsteht. Wie ist das möglich?

Nach dem Lenzschen Gesetz wird die Hemmung der Scheibe durch die Induktionsströme verursacht, die bei der Feldänderung im Leiter induziert werden. Unsere volle Aluminiumscheibe ist auch ein Leiter. Beim Durchschwingen durch das Magnetfeld wird deshalb auch in ihr eine Spannung induziert. Die Scheibe stellt als in sich geschlossener Leiter einen Kurzschlußkreis dar, in dem hoher Kurzschlußstrom entsteht. Der Strom hat hier jedoch nicht eine bestimmte Richtung wie in einem geraden Leitungsdraht, sondern er wirbelt in der Scheibe frei umher, er ist ein **Wirbelstrom**. Nach dem Lenzschen Gesetz sucht der Induktionsstrom seinen Entstehungsvorgang zu hemmen. Je stärker also der induzierte Wirbelstrom in der Scheibe ist, um so stärker wird ihre Bewegung abgebremst.

Jetzt wollen wir den Versuch mit einer geschlitzten Scheibe wiederholen. Wir schließen den Stromkreis und setzen die Scheibe in Bewegung. Das Pendel wird kaum gehemmt, sondern es schwingt langsam aus. Der Wirbelstromweg ist durch die Schlitzte unterbrochen. Außerdem kann sich



(Abb. 36)

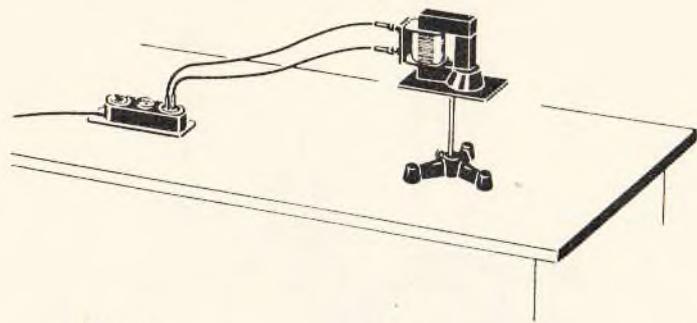
auf Grund des größeren Widerstandes des Stromweges kein starker Wirbelstrom bilden. Die in dieser Weise verkleinerten Wirbelströme verursachen auch nur eine kleinere Hemmung gegenüber dem ersten Versuch.

#### a) Die Wirbelstrombremsung

Bei dem Versuch nach Abb. 36 ist eine Aluminiumscheibe zwischen den Polen eines starken Elektromagneten drehbar gelagert. Die Scheibe kann mit Hilfe eines Fadens, der über eine feste Rolle läuft und an dessen freiem Ende ein Gewicht hängt, in Bewegung gesetzt werden. Das Gewicht fällt nach Freigabe nach unten und setzt die Scheibe in beschleunigte Drehbewegung. Wird nun der Stromkreis des Elektromagneten geschlossen, so wird die Drehbewegung soweit abgebremst, daß sie aus der Beschleunigung in eine gleichförmige Bewegung übergeht. Die richtige Steuerung der Abbremsung geschieht dabei durch Regeln des Feldstromes. Diese hier im Versuch beschriebene **Wirbelstrombremse** wird in der Praxis zur Dämpfung von Meßsystemen<sup>1)</sup>, Zählwerken, Elektrischen Waagen usw. verwendet.

#### b) Die Verringerung der Wirbelströme

Wir haben bei dem Versuch nach Abb. 35 gesehen, daß die Wirbelströme in der geschlitzten Scheibe nur gering waren. Sollen also die Wirbelströme verringert werden, muß man die Metallmasse möglichst fein unterteilen.



~ 220 V

(Abb. 37)

<sup>1)</sup> Vergleiche „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ Band B 5 unter B II 2

Der Versuch nach Abb. 37 wird uns das bestätigen. Wir verwenden hier einen Strom, der in der Sekunde 50mal seine Richtung ändert, das ist der technische Wechselstrom unserer Stromversorgungsnetze. Durch diesen Strom wird das magnetische Kraftfeld des Elektromagneten ebensooft seine Richtung ändern.

Zuerst wollen wir auf den U-förmigen Eisenkern ein **Joch** aus massivem Eisen setzen. Wir schließen dann den Stromkreis und warten einige Minuten. Mit zunehmender Zeit wird das Joch immer wärmer. Nun tauschen wir das massive Joch gegen ein geblätternes aus. Dieses geblätternes Joch wird aber nicht warm, auch nach längerer Zeit ist es immer noch kalt. Warum verhalten sich die beiden Joche so verschieden?

Infolge der ständigen Änderung des magnetischen Kraftfeldes (50mal in der Sekunde) wird im Eisen eine Spannung induziert, die in dem massiven Eisenkern einen so hohen Wirbelstrom verursacht, daß es heiß wird. Die Hitze kann so stark werden, daß die Wicklungen verschmoren würden.

**Durch Wirbelströme entsteht Wärmeenergie, die als Verlust angesehen werden muß**, weil sie ja von der zugeführten Energie abgezweigt wird. Diese sogenannten **Wärmeverluste können niedriggehalten werden, wenn man das Joch bzw. den Kern aus feinen Eisenblechen herstellt, die voneinander isoliert sind**. Solche Bleche sind 0,03 bis 1,5 mm stark. Die Isolation besteht aus Lack oder auch aus aufgeklebtem Seidenpapier. Je feiner die Bleche sind, um so geringer sind die Wirbelstromverluste.

In der Hochfrequenztechnik (Rundfunk, Fernsehen, Übertragung der Sprache und Musik überhaupt) genügen die feingebälternen (feinlamellierten) Kerne nicht zur Verhinderung der Wirbelströme, weil durch die sehr schnellen Richtungsänderungen der Feldströme sich auch das magnetische Kraftfeld sehr schnell ändert (1000mal und mehr in der Sekunde). Hier verwendet man die sogenannten **Massekerne**, bei deren Herstellung das Eisen in feinste Körnchen zermahlen wird. Die Körnchen werden in eine isolierende Masse eingebettet wieder zu einem Kern zusammengepreßt. Dadurch werden die Wirbelströme sehr kleingehalten, weil es für sie keinen Weg von Körnchen zu Körnchen mehr gibt.

Die Massekerne haben jedoch den Nachteil, daß ihre Permeabilität gering ist gegenüber den geblätternen Kernen, weil die magnetischen Kraftlinien die mit Isoliermasse ausgefüllten Zwischenräume zwischen den einzelnen Eisenkörnchen überbrücken müssen, der Isolierstoff aber nur geringe magnetische Leitfähigkeit besitzt.

## 5. Anwendungsbeispiele

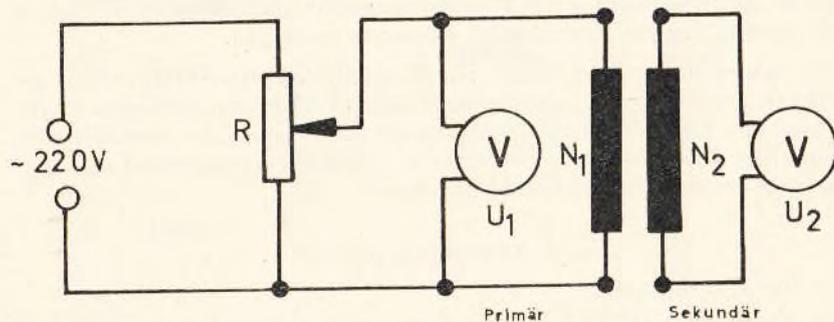
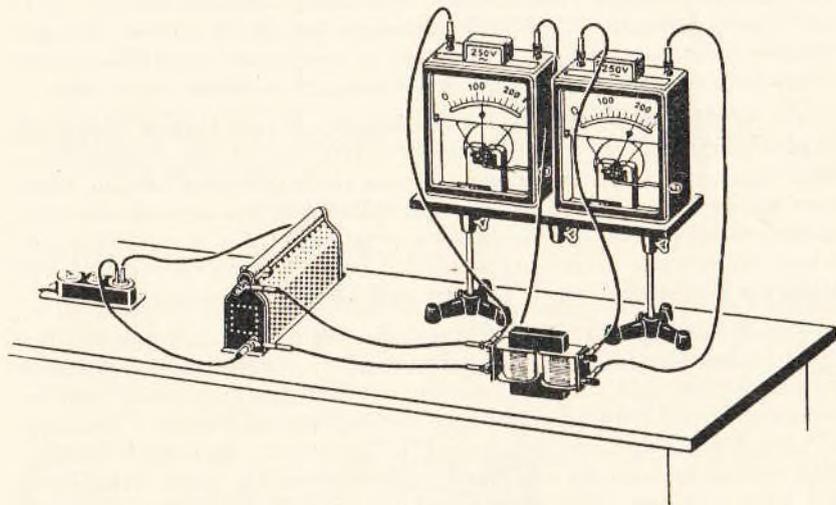
#### a) Der Transformator

Im Abschnitt A III 3 c haben wir festgestellt, daß bei dem Versuch nach Abb. 34 in der unteren Spule (2. Spule), die von dem Kraftfeld des Elektromagneten (1. Spule) durchdrungen wird, eine Spannung induziert

wurde, sobald das magnetische Feld sich änderte. Diese Tatsache nutzt man bei Wechselstrom aus, um eine Spannung zu vergrößern oder zu verringern.

### aa) Das Verhältnis der Spannungen

Das Ergebnis des Versuchs nach Abb. 34 wird günstiger, wenn man **beide Spulen** auf einen geschlossenen Eisenkern bringt. Diese Anordnung nennt man **Transformator** (Umformer), sie ist in dem Versuchsaufbau



(Abb. 38)

nach Abb. 38 dargestellt. Die eine Spule  $N_1$  liegt über den Spannungsteiler  $R$  an der Netzwechselspannung von 220 Volt, außerdem sind Anfang und Ende der Spule mit einem Spannungsmesser verbunden. Die zweite Spule  $N_2$  wird mit einem zweiten Spannungsmesser verbunden. Beide Spulen sind auf **einen** U-förmigen Eisenkern aufgebracht.

Die Spule  $N_1$  liegt im ersten Stromkreis oder im **Primärkreis** (primus = der erste); sie heißt deshalb auch **Primärspule** und die an ihr gemessene Spannung heißt **Primärspannung**, den in ihr fließenden Strom bezeichnet man mit **Primärstrom**.

Die Spule  $N_2$  bildet den zweiten Stromkreis, den **Sekundärkreis** (sekundus = der zweite). Sinngemäß ist hier die Spannung die **Sekundärspannung** und der Strom der **Sekundärstrom**.

Durch den geschlossenen Eisenkern, der zur Vermeidung von Wirbelströmen geblättert ist, ist ein geschlossener Kraftlinienweg gegeben. Das ist wichtig, weil für **beide** Spulen gleiche magnetische Verhältnisse vorhanden sein müssen.

Wir wollen nun an die Primärspule eine konstante Spannung von 100 Volt anlegen; als Sekundärspulen wollen wir dabei Spulen mit verschiedenen Windungszahlen verwenden. Alle Daten und die abgelesenen Meßergebnisse tragen wir in eine Tabelle ein:

Primärkreis		Sekundärkreis		Verhältnisse	
$N_1$ Wdgn	$U_1$ V	$N_2$ Wdgn	$U_2$ V	$N_1 : N_2$	$U_1 : U_2$
600	100	300	50	2 : 1	2 : 1
600	100	600	100	1 : 1	1 : 1
600	100	1200	200	1 : 2	1 : 2

Wir stellen fest:

Die **Primärspannung** verhält sich zur **Sekundärspannung** wie die **Primärwindungszahl** zur **Sekundärwindungszahl**.

In eine Formel gebracht; ergibt sich das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ :

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

Die Richtigkeit unserer Feststellung ist anhand der uns bereits bekannten Formel

$$E = \frac{B \cdot l \cdot v}{100\,000\,000}$$

zu beweisen:

**Die magnetische Induktion  $B$**  ist für beide Spulen gleich groß. Sie wird in der Primärspule erzeugt und durchdringt in gleicher Stärke die Sekundärspule.

**Die Geschwindigkeit  $v$  der Feldänderung** ist abhängig von der Anzahl der Stromrichtungswechsel in der Sekunde, sie ist ebenfalls für beide Spulen gleich.

**Die Leiterlänge  $l$**  in der Sekundärspule ist aber geändert worden. War die Leiterlänge doppelt so groß wie die der Primärspule, war auch die Sekundärspannung doppelt so groß wie die Primärspannung.

**1. Beispiel:**

Ein Transformator soll 500 Volt auf 230 Volt umspannen. Die Primärspule hat 250 Windungen. Wieviel Windungen muß die Sekundärspule haben?

Gegeben:  $U_1 = 500\text{ V}$      $U_2 = 230\text{ V}$      $N_1 = 250\text{ Windungen}$

Gesucht:  $N_2$

Lösung:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ;  $N_2 = \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1} = \frac{230 \cdot 250}{500} = 115\text{ Windungen}$

**2. Beispiel:**

Ein Transformator soll 6 kV auf 220 V umspannen. Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis, und wie groß muß die Primärwindungszahl gewählt werden, wenn die Sekundärspule 200 Windungen hat?

Gegeben:  $U_1 = 6000\text{ V}$      $U_2 = 220\text{ V}$      $N_2 = 200\text{ Windungen}$

Gesucht:  $\bar{u}$

Lösung:  $\bar{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6000}{220} = 27,3 : 1$

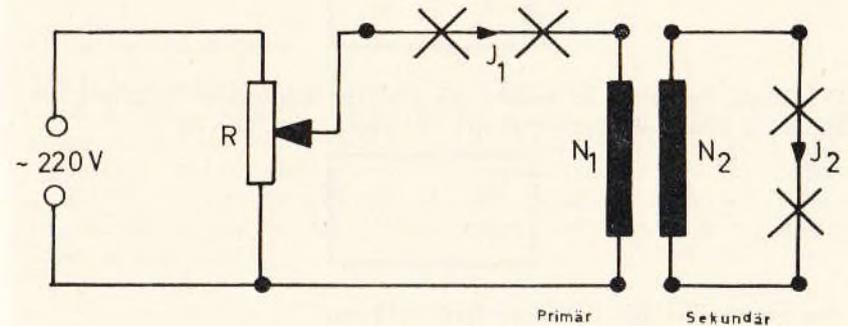
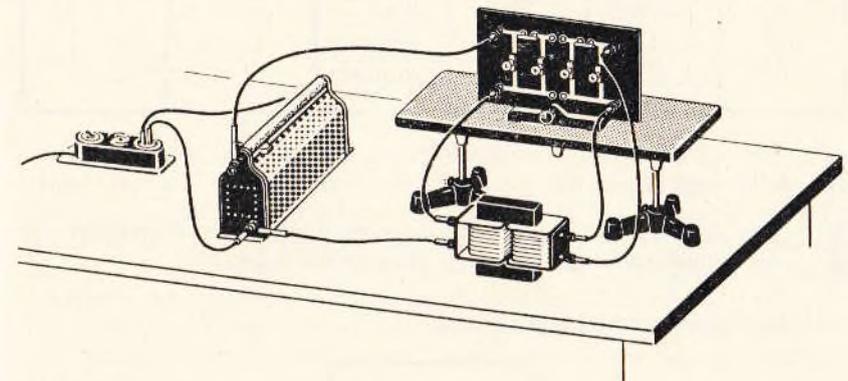
$\bar{u} = \frac{N_1}{N_2}$ ;  $N_1 = \bar{u} \cdot N_2 = 27,3 \cdot 200 = 5460\text{ Windungen}$

**bb) Das Verhältnis der Ströme**

Zu Beginn eines jeden Versuchs nach Abb. 39 wird der Spannungsteiler R auf Null gestellt und die vier Glühlampen fest in die Fassungen eingeschraubt. Wir verwenden die gleichen Spulen wie im Versuch nach Abb. 38.

Beim Übersetzungsverhältnis 600 zu 300 Windungen (Wdgn) regeln wir die Primärspannung so ein, daß die Lämpchen des Sekundärkreises normal brennen. Die beiden Lämpchen im Primärkreis brennen dann nur halb so hell. Drehen wir ein Lämpchen des Primärkreises aus, so brennt das andere genauso hell wie die Lämpchen des Sekundärkreises.

**Das Verhältnis der Ströme**



(Abb. 39)

Beim Verhältnis 600 zu 600 Wdgn brennen die Lämpchen des Primärkreises und die des Sekundärkreises gleich hell.

Beim Verhältnis 600 zu 1200 Wdgn regeln wir die Primärspannung so ein, daß die Primärlämpchen normal hell brennen. Nun brennen die Lämpchen des Sekundärkreises nur halb so hell. Wird eines von ihnen aus der Fassung geschraubt, brennt das andere genauso hell wie die Lämpchen im Primärkreis.

Unsere Beobachtungen tragen wir in die Tabelle ein:

Primärkreis		Sekundärkreis		Verhältnisse	
$N_1$ Wdgn	Lämp- chen	$N_2$ Wdgn	Lämp- chen	$N_1 : N_2$	$I_1 : I_2$
600	dunkel	300	hell	2 : 1	1 : 2
600	hell	600	hell	1 : 1	1 : 1
600	hell	1200	dunkel	1 : 2	2 : 1

Wir stellen fest:

Der Primärstrom verhält sich zum Sekundärstrom umgekehrt wie die Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl.

Auf eine Formel gebracht, ergibt sich

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

Wenn sich die Ströme umgekehrt wie die Windungszahlen verhalten, verhalten sie sich auch umgekehrt wie die Spannungen, also ist

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Aus unserer Tabelle können wir ferner ablesen:

Mit Hilfe des Transformators kann die Spannung auf Kosten der Stromstärke oder die Stromstärke auf Kosten der Spannung erhöht werden, aber niemals beides zugleich.

Damit muß also das Produkt aus Spannung und Stromstärke auf der Primärseite und auf der Sekundärseite gleich groß sein:

$$P_1 = P_2$$

Beispiel:

Ein Transformator gibt sekundär eine Leistung  $P_2 = 5 \text{ kVA}$  bei einer Spannung von  $115 \text{ V}$  ab. An der Primärseite werden  $380 \text{ V}$  zugeführt. Wie groß ist die Übersetzung und welcher Strom fließt primär und sekundär?

Gegeben:  $P_2 = 5000 \text{ VA}$      $U_1 = 380 \text{ V}$      $U_2 = 115 \text{ V}$

Gesucht:  $\ddot{u} = \frac{I_1}{I_2}$

Lösung:  $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{115} = 3,3 : 1$

$P_2 = U_2 \cdot I_2$ ;  $I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{5000}{115} = 43,5 \text{ A}$

$P_1$  muß um das Übersetzungsverhältnis kleiner sein als  $P_2$ , also

$\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1}$ ;  $I_1 = \frac{I_2}{\ddot{u}} = \frac{43,5}{3,3} = 13,2 \text{ A}$

Die Sekundärleistung ist normalerweise etwas kleiner als die Primärleistung. Wir müssen also beim Transformator mit einem Leistungsverlust rechnen, der sich aus den Ohmschen Verlusten in den Spulen (Wicklungsverluste) und den Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten des Eisens (Leerlaufverluste) zusammensetzt. Der Wirkungsgrad des Transformators ist aber sehr günstig, nämlich etwa  $0,95$ . Zur Überbrückung der Leistungsverluste wird der Primärseite eine Leistung zugeführt, die um den Verlust größer ist. Dadurch erhält man an der Sekundärseite die volle Spannung.

#### b) Die Induktionsspule

Die Induktionsspule, die wir in jedem Fernsprechapparat finden, ist in ihrem Aufbau ein Transformator. Sie hat allerdings statt des U-förmigen Kerns einen lamellierten flachen Weicheisenkern. Die Induktionsspule wird nicht zum Transformieren von Spannungen verwendet, sondern dient in der Hauptsache dazu, den gleichstromdurchflossenen Mikrophonstromkreis von dem Fernhörer getrennt zu halten. Näheres hierüber siehe Handbuch Band C 4.

#### c) Der Übertrager

Die Übertrager sind ähnlich aufgebaut wie die Transformatoren. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, daß sowohl die Primär- als auch die Sekundärwicklung in der Mitte aufgetrennt und die Wicklungshälften an Klemmen herangeführt sind, die bestimmte Bezeichnungen tragen.

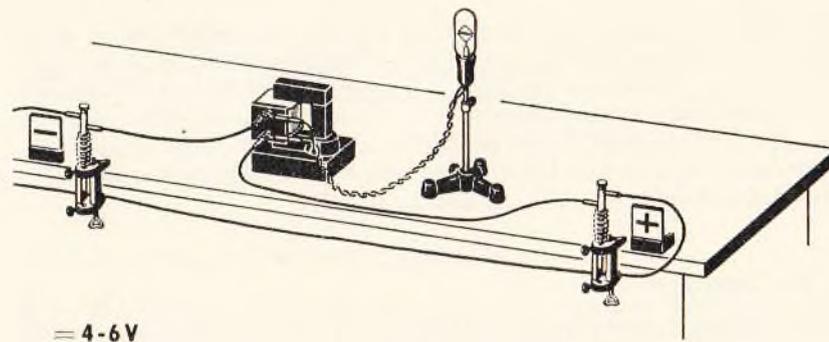
Die Übertrager werden u. a. dazu verwendet, Gleich- und Wechselstromkreise voneinander zu trennen. Das Übersetzungsverhältnis der Übertrager bezieht sich nicht auf die Windungszahlen der Spulen, sondern auf die zum Anschluß vorgesehenen Wellenwiderstände von Fernleitungen. (Näheres hierüber siehe im Abschnitt D III.)

## 6. Übungsaufgaben

a) Wovon ist die Richtung des Induktionsstromes abhängig? b) Nenne die Lenzsche Regel und erläutere sie! c) Wenn man bei einem Fahrraddynamo das Laufrad von Hand dreht, so spürt man deutlich einen Widerstand gegen die Drehrichtung, obwohl doch der Anker fast reibungslos gelagert ist. Erkläre diesen Vorgang! d) Von welchen Größen ist die Induktionsspannung abhängig? e) Ein Kraftfeld hat eine magnetische Induktion von 600 Gauß. Ein 85 cm langer Leiter taucht 35 cm tief in das Kraftfeld ein, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 10 m/sec. Wie groß ist die induzierte Spannung? f) Warum werden Spulenkern aus feinslamellierten Eisenblechen hergestellt? g) Was versteht man unter Massekernen? h) Wie verhalten sich Windungszahlen, Spannungen und Ströme im Transformator zueinander? i) Ein Transformator soll 6000 Volt auf 525 Volt umspannen. Wie groß ist sein Übersetzungsverhältnis, und wie groß muß die Sekundärwindungszahl sein, wenn die Primärspule 2500 Windungen hat? k) Ein Transformator ist für die Umspannung von 110 Volt auf 220 Volt vorgesehen. Kann man ihn auch für eine Umspannung von 220 Volt auf 110 Volt verwenden? l) Ein Klingeltransformator soll die Netzspannung von 220 Volt auf 12 Volt umspannen. Wie groß muß die Sekundärwindungszahl sein, wenn die Primärspule 1000 Windungen hat? Welche Stromstärke wird dem Netz entnommen, wenn von dem hinter dem Trafo liegenden Gerät 0,5 Ampere verbraucht werden?

## IV. Die Selbstinduktion

Bei dem Versuch nach Abb. 40 wird der Stromkreis der Spule mit einer Spannung von 6 Volt betrieben. Parallel zur Spule wird eine Glühlampe mit einer Zündspannung von 220 Volt gelegt. Wird der Stromkreis ge-



(Abb. 40)

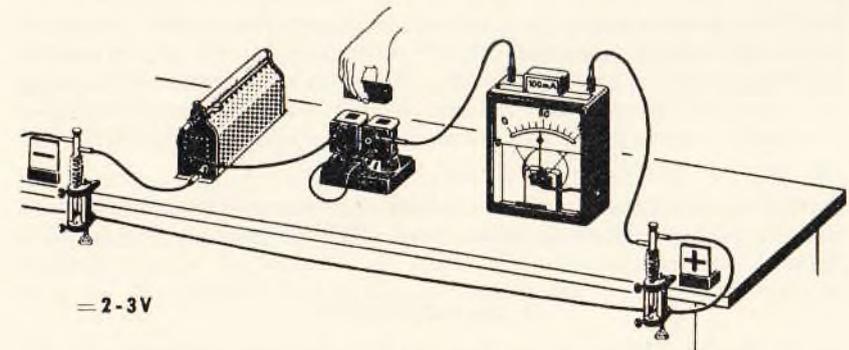
schlossen, bleibt die Lampe dunkel. Wenn wir jedoch den Stromkreis schnell und plötzlich öffnen, so blitzt die Glühlampe auf. Das bedeutet, daß im Augenblick des Öffnens des Stromkreises in der Spule eine Spannung von 220 Volt vorhanden sein muß, obwohl an die Spule nur 6 Volt angelegt worden sind. Worin hat die hohe Spannung ihre Ursache?

In dem Augenblick, in dem der Stromkreis geöffnet wird, bricht das Magnetfeld plötzlich zusammen. Das entspricht einer schnellen starken Änderung des magnetischen Kraftfeldes, die in dem Spulendraht (Leiter) eine Spannung induziert. Diese Spannung ist sehr hoch infolge der hohen Windungszahl (1200 Wdgn) und des großen Kraftflusses in dem geschlossenen Eisenkern.

Weil die hohe Spannung in der Spule des Elektromagneten selbst induziert wird, wird sie Selbstinduktionsspannung genannt.

### 1. Die Richtung des Selbstinduktionsstromes

Bei dem Versuch nach Abb. 41 bleibt die Spule zunächst noch ohne Joch. Den Strom regeln wir mit Hilfe des Schiebewiderstandes so ein, daß das Milliampereometer einen Wert von 50 mA anzeigt. Nun legen wir das Joch



(Abb. 41)

auf und entfernen es wieder. Diesen Vorgang wiederholen wir einige Male und beobachten dabei das Meßinstrument:

Wenn wir das Joch auflegen, geht der Instrumentenzeiger in Richtung auf Null zurück und steigt dann aber wieder auf seinen ursprünglichen Wert an. Entfernen wir das Joch, so steigt der Zeiger über den Wert von 50 mA hinaus an und geht dann wieder auf den alten Wert zurück. Wie ist das zu erklären?

Beim Auflegen des Joches ist der Induktionsstrom so gerichtet, daß er den Spulenstrom schwächt, er ist dem Spulenstrom entgegengerichtet. Die Schwächung des Feldstromes (Spulenstromes) bedeutet aber auch eine Schwächung des Kraftflusses. Durch das Auflegen des Joches wird normalerweise der Kraftfluß in einem Eisenkern erhöht. Wenn hier der Kraftfluß geschwächt worden ist, so bedeutet das, daß der Induktionsstrom sich der Erhöhung des Kraftflusses widersetzt.

Beim Entfernen des Joches wurde der Feldstrom durch den Induktionsstrom vergrößert. Der Induktionsstrom hat also die gleiche Richtung wie der Feldstrom, er versucht, die Feldschwächung zu verhindern.

## 2. Die Selbstinduktionsspannung

Wir haben in dem Versuch nach Abb. 40 das Vorhandensein einer Induktionsspannung festgestellt. Nach dem im vorhergehenden Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen ist nun auch zu verstehen, daß im ersten Versuch beim Schließen des Stromkreises die Glimmlampe dunkel blieb und beim Öffnen aufleuchtete.

Hier ist ebenfalls die Lenzsche Regel zugrunde zu legen:

**Die Selbstinduktionsspannung ist so gerichtet, daß sie durch das von ihr aufgebaute Kraftfeld den Entstehungsvorgang zu hemmen sucht.**

Die Induktionsspannung ist also beim Schließen des Kreises der angelegten Spannung entgegengerichtet, und beim Öffnen hat sie die gleiche Richtung wie die angelegte Spannung. Beim Schließen wird die Spannung verringert, weil nur noch die Differenz von der angelegten zur Induktionsspannung wirksam ist; beim Öffnen wird die Spannung vergrößert, weil jetzt die Summe beider Spannungen wirksam ist.

Da die Induktionsspannung der angelegten Spannung entgegenwirkt, wird sie auch Gegenelektromotorische Kraft, **GEMK**, genannt (EMK siehe Band B 3 unter D II).

## 3. Die Induktivität

Die Größe der **GEMK** ist von den gleichen Faktoren abhängig wie die Induktionsspannung. Sie wächst mit der Länge des Leiters und mit der Geschwindigkeit der Feldänderung. Bei der eisenlosen Spule tritt an die Stelle der magnetischen Induktion der Strom, weil bei festgelegter Windungszahl die Stärke des Kraftfeldes nun nur noch von der Stromstärke abhängig ist. Die Geschwindigkeit der Feldänderung ist von der Häufigkeit der Stromrichtungsänderungen (50mal in der Sekunde bei technischem Wechselstrom) abhängig.

Die Selbstinduktion einer Spule bezeichnet man mit dem Buchstaben *L*. Man spricht auch statt von der Selbstinduktion von der **Induktivität** einer Spule. Die Maßeinheit der Induktivität ist das Henry<sup>1)</sup> (H).

Man hat festgelegt:

**Eine Spule hat die Induktivität von 1 Henry, wenn in ihr die Änderung der Stromstärke von 1 Ampere je Sekunde eine GEMK von 1 Volt induziert.**

<sup>1)</sup> Henry, amerikanischer Physiker, 1797—1878

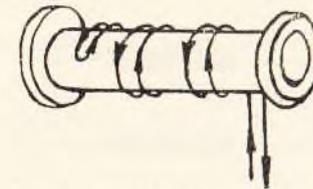
Weil der Wert 1 Henry sehr groß ist, rechnet man mit Millihenry (1 mH = 1/1000 H) und Mikrohenry (1  $\mu$ H = 1/1000000 H).

### a) Veränderung der Induktivität

Die Induktivität einer Spule wird durch einen Eisenkern vergrößert, weil der Kraftfluß ansteigt. Die Größe des Kraftflusses ist u. a. von der magnetischen Leitfähigkeit abhängig. Deshalb hat eine Spule mit Eisenkern auf Grund der besseren Leitfähigkeit des Eisens gegenüber Luft ein stärkeres Kraftfeld und damit eine höhere Induktivität. Die höchste Induktivität wird bei vollem Eisenschluß einer Spule erreicht.

Bei großen Spulen kann die Selbstinduktion so hoch werden, daß die beim Öffnen des Stromkreises entstehende Induktionsspannung die Windungen durchschlägt. Diese Gefahr ist bei Elektromagneten, Generatoren und Elektromotoren gegeben. Man begegnet ihr dadurch, indem man im Augenblick des Ausschaltens parallel zur Spule einen ohmschen Widerstand legt oder aber die Spule kurzschließt. Dadurch wird am Widerstand bzw. am ohmschen Widerstand der Spule (Widerstand des Spulendrahtes) nach dem Ohmschen Gesetz  $U_v = I \cdot R$  ein Spannungsabfall erzeugt, der die **GEMK** (bei richtiger Bemessung des Widerstandes) restlos verbraucht.

Ein **Drahtwiderstand**, wie er als Bauelement der Fernmeldetechnik überall verwendet wird, **gleich einer Spule**. In ihm kann also auch eine Induktivität entstehen. In vielen Fällen ist aber diese Induktivität unerwünscht. Deshalb werden die Widerstände bifilar gewickelt, wie es die Abb. 42 zeigt. In der bifilaren (zweidrähtigen) Wicklung, in der die Stromrich-



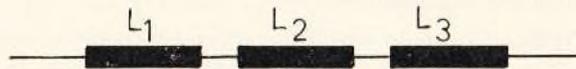
(Abb. 42)

tungen entgegengesetzt sind (siehe Pfeile in Abb. 42), **heben sich die magnetischen Kraftfelder gegenseitig auf**. Es kann keine Induktionsspannung entstehen.

### b) Die Schaltung von Induktivitäten

Die Induktivitäten verhalten sich wie die ohmschen Widerstände, vorausgesetzt, daß sich ihre Kraftfelder nicht gegenseitig beeinflussen. Es gelten

also die gleichen Gesetze wie bei den Widerstandsschaltungen (siehe Band B 3 „Handbuch für den Fernmeldehandwerker der DBP“ unter D VII):



(Abb. 43)

#### Reihenschaltung:

Die Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Teilinduktivitäten.

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

#### Beispiel:

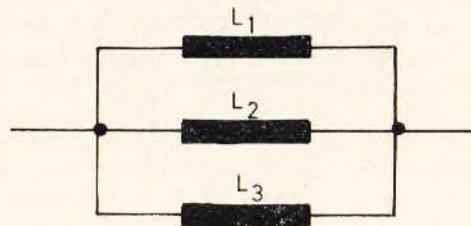
Drei Spulen mit 800 mH, 1,5 H und 2,5 H sind hintereinander geschaltet. Wie groß ist ihre Gesamtinduktivität?

Gegeben:  $L_1 = 0,8 \text{ H}$      $L_2 = 1,5 \text{ H}$      $L_3 = 2,5 \text{ H}$

Gesucht:  $L$

Lösung:  $L = L_1 + L_2 + L_3 = 0,8 + 1,5 + 2,5 = 4,8 \text{ H}$

#### Parallelschaltung:



(Abb. 44)

Die Gesamtinduktivität ist stets kleiner als die kleinste Teilinduktivität.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

#### Beispiel:

Drei Spulen mit einer Induktivität von 0,02 H, 0,04 H und 0,08 H sind parallel geschaltet. Wie groß ist die gesamte Induktivität der Schaltung?

Gegeben:  $L_1 = 0,02 \text{ H}$      $L_2 = 0,04 \text{ H}$      $L_3 = 0,08 \text{ H}$

Gesucht:  $L$

$$\text{Lösung: } \frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} = \frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,04} + \frac{1}{0,08} = 87,5$$

$$L = \frac{1}{87,5} = 0,0114 \text{ H}$$

## 4. Übungsaufgaben

a) Erkläre das Entstehen einer Selbstinduktionsspannung? b) Von welchen Faktoren ist die Induktivität abhängig? c) Eine Spule hat eine Induktivität von 0,0475 H. Wieviel mH sind das? d) Auf welche Weise kann man unerwünschte Induktivität unterbinden? e) Warum entsteht an einem Schalter, mit dem ein Spulenstromkreis geschaltet wird, beim Ausschalten ein Funke, aber nicht beim Einschalten? f) Was ist eine Bifilarwicklung? g) Wie verhalten sich Induktivitäten beim Zusammenschalten im Vergleich zu Widerständen? h) Wie groß ist die gesamte Induktivität zweier in Reihe geschalteter Spulen, die beide eine Induktivität von 0,75 H haben. i) Zu zwei parallel geschalteten Spulen mit je 0,08 H sollen zwei weitere von je 125 mH parallel geschaltet werden, wie groß ist die Gesamtinduktivität? k) Zwei Spulen mit 1,2 H und 800 mH sollen mit einer dritten hintereinandergeschaltet werden. Die gesamte Induktivität ergibt 2,5 H, wie groß muß dann die Induktivität der dritten Spule sein?

## V. Bewegung durch Induktion

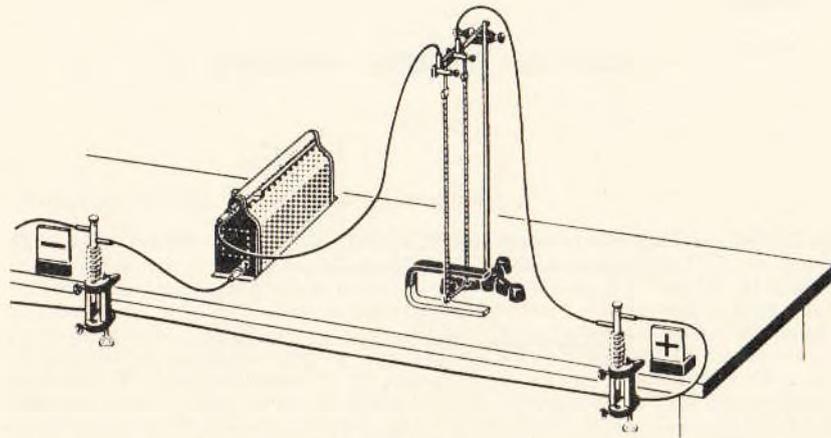
### 1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 45 wird ein Leiter an zwei Metallbändern aufgehängt, die gleichzeitig als Stromzuführung dienen. Mit Hilfe des Schiebewiderstandes wird ein mittelstarker Strom eingestellt, so daß die Metallbänder nicht überlastet werden. Der Stromleiter wird genau in das homogene Kraftfeld eines Hufeisenmagneten gehängt.

Der Strom wird eingeschaltet, der Leiter bewegt sich aus dem Magneten heraus. Nun wird die Stromrichtung umgekehrt, der Leiter bewegt sich in den Magneten hinein. Lassen wir diese Stromrichtung bestehen und drehen stattdessen den Magneten um, so wird der Leiter wieder aus dem Magneten heraus bewegt. Wir stellen fest:

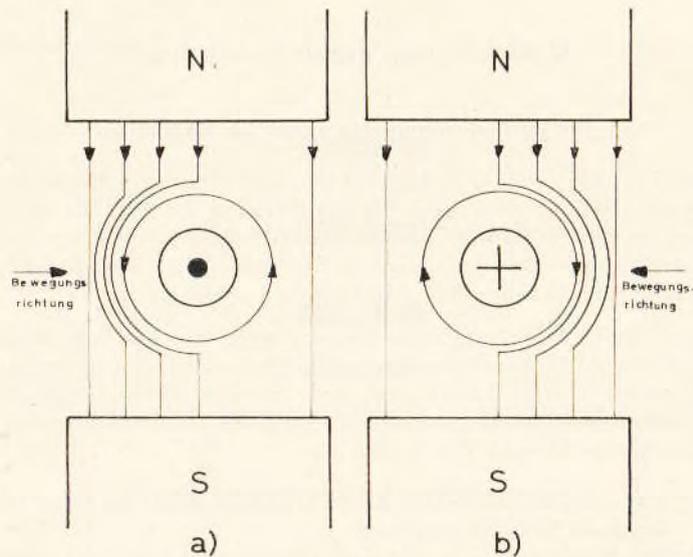
1. Ein stromdurchflossener Leiter erhält im Kraftfeld eines Magneten einen Bewegungsantrieb.
2. Die Richtung des Bewegungsantriebs wird bestimmt durch die Stromrichtung und durch die Richtung der Feldlinien.

Die Bewegungsrichtung soll anhand der Abb. 46 erläutert werden. Im ersten Fall kommt der Strom im Leiter auf den Beschauer zu und bildet ein linksdrehendes Feld um den Leiter. Durch dieses Feld werden die



= 3-4 V

(Abb. 45)



(Abb. 46)

Feldlinien im Magneten rechts fast aufgehoben, weil sie entgegengesetzt verlaufen. Rechts wird das Kraftfeld geschwächt. Links vom Leiter summieren sich die Feldlinien um den Leiter mit den Feldlinien des Kraftfeldes, wodurch das Feld links vom Leiter wesentlich verstärkt wird. Der Leiter wird von den verstärkten Kraftlinien in Richtung auf das geschwächte Feld zu aus dem Magneten herausgedrückt.

Nach Umkehrung der Stromrichtung fließt der Strom vom Beschauer fort, es wird also ein rechtsdrehendes Feld um den Leiter gebildet. Dadurch werden die Feldlinien rechts vom Leiter verstärkt und links geschwächt. Der Leiter erhält einen Bewegungsantrieb nach links.

Nach dem Umdrehen des Magneten wurde auch die Richtung der Feldlinien umgekehrt. Der Strom fließt zwar wie im vorhergehenden Fall vom Beschauer fort, durch das Umkehren der Kraftfeldrichtung wird jedoch das Feld rechts geschwächt und links verstärkt. Der Leiter wird also wie im ersten Fall nach rechts aus dem Magneten herausgedrückt.

Werden die Stromrichtung im Leiter und die Richtung des Kraftfeldes gleichzeitig geändert, so ändert sich die Bewegungsrichtung des Leiters nicht.

Die Bewegungsrichtung des Leiters kann man mit Hilfe der Linken-Hand-Regel bestimmen:

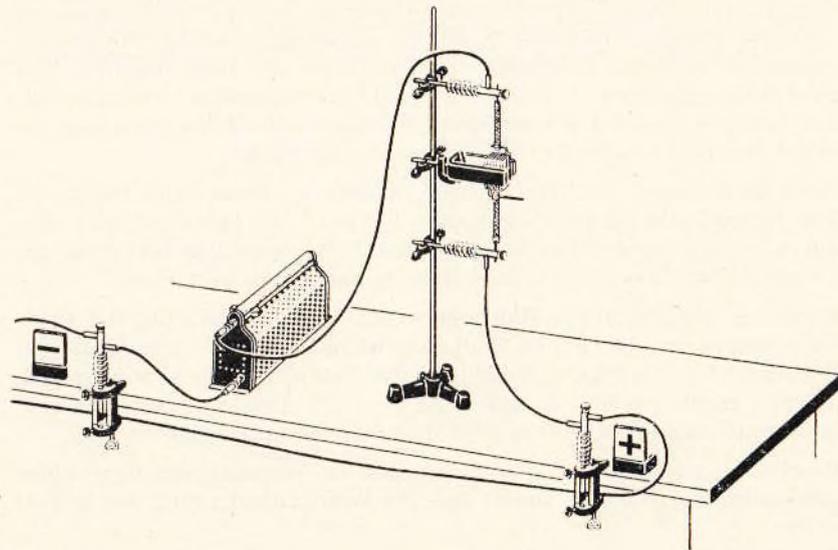
Läßt man die Kraftlinien des Magneten in den Handteller der linken Hand eintreten, wobei die Fingerspitzen in die Richtung des Stromes weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

## 2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 47 wird eine Spule an beweglichen Metallbändern, die auch zur Stromzuführung dienen, in das Kraftfeld eines starken Hufeisenmagneten gehängt. Beim Schließen des Stromkreises wird in der Spule ein Kraftfeld erzeugt. Die Spule dreht innerhalb des Magneten rechtsherum. Wird die Stromrichtung umgekehrt, dreht sich die Spule linksherum. Lassen wir diese Stromrichtung bestehen und drehen stattdessen den Magneten um, so dreht sich die Spule wieder rechtsherum. Wir stellen fest:

1. Eine stromdurchflossene Spule erhält im Kraftfeld eines Magneten einen Drehantrieb.
2. Die Richtung des Drehantriebs ist von der Stromrichtung in der Spule und von der Richtung des Magnetfeldes abhängig.

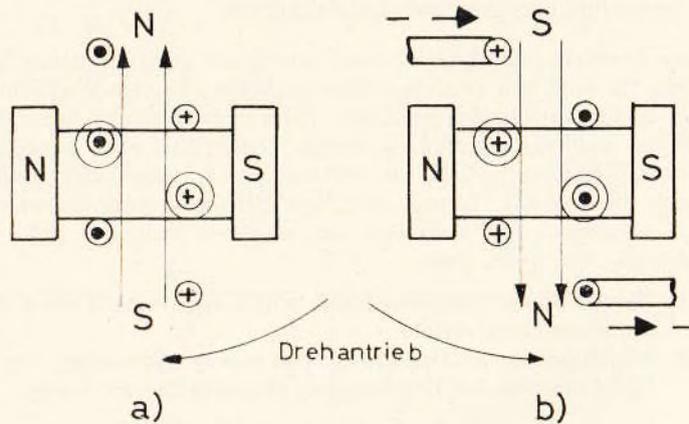
Mit Hilfe der Abb. 48 soll der Vorgang erläutert werden. In der Spule wird beim Stromdurchgang ein Magnetfeld erzeugt, dessen Richtung



= 3-4 V

(Abb. 47)

### Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld



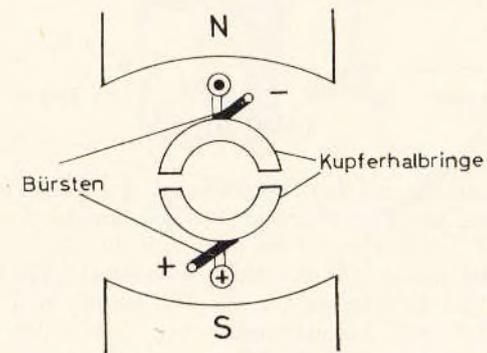
(Abb. 48)

durch die Felder um die einzelnen Spulenleiter gegeben ist (siehe auch Abschnitt A II 2 a). Das Feld des Dauermagneten und das der Spule stehen zu Beginn des Versuches senkrecht zueinander und haben das Bestreben, sich in die gleiche Richtung einzustellen (Magnetnadel im Erdkraftfeld). In Abb. 48a wird sich deshalb die Spule rechts herum drehen, und in Abb. 48b wird sie sich links herum drehen.

Der Drehantrieb ist so lange vorhanden, bis sich beide Kraftfelder in die gleiche Richtung eingestellt haben. Die Spule macht also nur eine Drehung um  $180^\circ$ . Danach bleibt sie stehen, weil die Ursache des Drehantriebs nicht mehr vorhanden ist.

Wollte man eine Drehung über  $180^\circ$  bis auf  $360^\circ$  erreichen, müßte man im Augenblick des Stillstandes der Spule die Stromrichtung ändern. Den Bereich des Stillstandes nennt man die **neutrale Zone** und statt vom Ändern der Stromrichtung spricht man vom **Wenden des Stromes**. In der Praxis wird die Umkehrung der Stromrichtung in der Spule durch den **Stromwender (Kommutator)** vorgenommen. Die Spule wird nach Abb. 49 mit ihrem Anfang und dem Ende an einen Halbring aus Kupfer gelegt. Die Halbringe sind voneinander isoliert. Die Stromzufuhr erfolgt über

### Das Wenden des Stromes



(Abb. 49)

**Kohlebürsten.** Die Kohlebürsten sind so angeordnet, daß die Stromwendung gerade dann erfolgt, wenn die Spulenleiter sich in der neutralen Zone befinden.

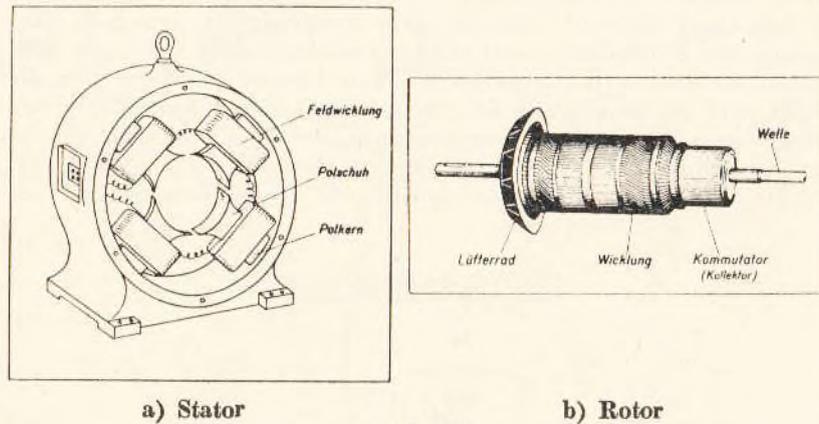
Eine Spule, die mit einem Stromwender versehen ist, und die infolge des sie durchfließenden Gleichstroms im Magnetfeld eines Dauer- oder Elektromagneten einen Drehantrieb erhält, hat die Wirkungsweise eines **Gleichstrommotors**.

Nach den bisher gewonnenen Erkenntnissen können wir folgern:

Ein Motor wird um so schneller laufen, je stärker das Magnetfeld, je größer die Windungszahl der Spule und je höher die Stromstärke in der Spule ist.

### 3. Der Aufbau eines Gleichstrommotors

Zur Erreichung eines starken Magnetfeldes verwendet man keinen Dauermagneten, sondern einen **Elektromagneten**. Das **Magnetgestell** ist der stillstehende Teil des Motors und wird deshalb auch **Stator** genannt. Es besteht aus



(Abb. 50)

dem Stahlblechgehäuse und den Polkernen mit den Polschuhen, die beide zur Verminderung der Wirbelströme aus Dynamoblechen zusammengesetzt sind. Auf den Polkernen befindet sich die Magnetwicklung, die man **Feldwicklung** nennt. Die stromdurchflossene Spule wird zur Verringerung der Wirbelströme in ein aus Dynamoblechen zusammengesetztes Blechpaket, den **Anker**, eingebettet. Der Anker wird als der umlaufende Teil des Motors auch **Rotor** genannt. Die Spulenanschlüsse werden an den Stromwender, der auch **Kummutator** oder **Kollektor** genannt wird, dergestalt herangeführt, daß für jede Spule ein Kollektorsegment vorhanden ist. Die Zuführung des Spulenstromes geschieht durch **Bürsten**, die auf dem Kollektor schleifen.

### 4. Übungsaufgaben

a) Wovon ist der Bewegungsantrieb eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld abhängig? b) Wie heißt die Linke-Hand-Regel? c) Erläutere den Drehantrieb einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld. d) Von welchen Faktoren ist die Motorgeschwindigkeit eines Gleichstrommotors abhängig?

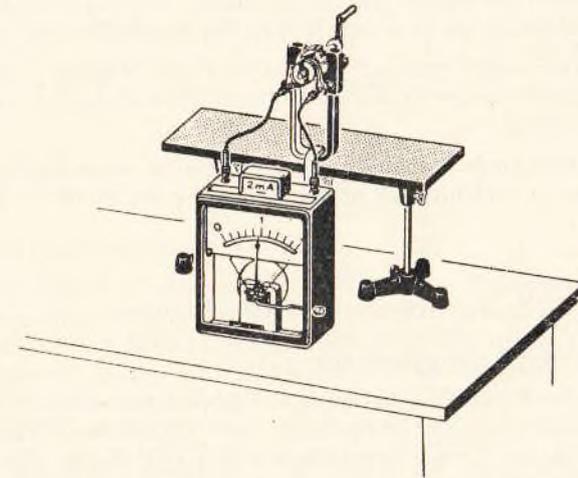
## B. Grundlagen der Wechselstromlehre

### I. Die Entstehung des Wechselstromes

#### 1. Die bewegte Spule im Magnetfeld

Im Kapitel A III haben wir festgestellt, daß in einem Leiter, der im Magnetfeld bewegt wird, eine Induktionsspannung erzeugt wird.

Der Versuch nach Abb. 51 soll uns zeigen, welche Wirkung ein zu einer Spule aufgewickelter Leiter zeigt, wenn die Spule in einem Magnetfeld gedreht wird.



(Abb. 51)

Im Magnetfeld eines Dauermagneten (man kann natürlich auch einen Elektromagneten verwenden) wird eine Spule, die auf einen Doppel-T-Anker aufgebracht ist, gedreht. Anfang und Ende der Spule sind an je einen Schleifring gelegt, von denen mit Hilfe von Kohlebürsten die Spannung abgenommen werden kann. Das angeschlossene Milliampere-meter mit Gleichstrommeßbereich ist mit seinem Nullpunkt auf die Mitte der Skala eingeregelt.

Wenn die Kurbel und damit der Anker langsam gedreht werden, machen wir folgende Beobachtungen:

### a) Die Wechselfspannung

Während der ersten halben Kurbelumdrehung schlägt das Milliampere-meter nach rechts und während der zweiten Hälfte der Umdrehung nach links aus. Das Instrument zeigt einen Strom an, der während einer Kurbelumdrehung seine Richtung einmal ändert. Daraus folgt, daß in der Spule eine Spannung wechselnder Richtung entstanden ist. Wir erkennen:

**In einer Spule, die in einem Magnetfeld gedreht wird, wird eine Spannung wechselnder Richtung (eine Wechselfspannung) induziert.**

### b) Der Wechselstrom

Von dem Milliampere-meter wurde ein Strom angezeigt, der bei der ersten halben Kurbelumdrehung eine andere Richtung hatte als bei der zweiten Umdrehung. Weil der Strom wie die Spannung beim Drehen der Spule ständig seine Richtung wechselt, nennt man ihn Wechselstrom.

Beim Drehen der Kurbel verspürt man deutlich eine Hemmung, zu deren Überwindung Kraft aufgewendet werden muß. Diese Tatsache entspricht dem Lenzschen Gesetz:

**Die in einer Spule induzierte EMK verursacht einen Strom, dessen Richtung so verläuft, daß er die Bewegung der Spule zu hemmen sucht.**

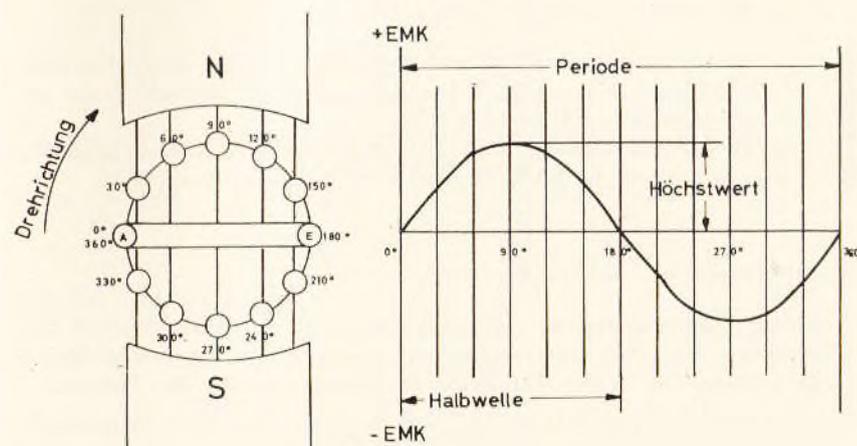
## 2. Die Frequenz des Wechselstromes

### a) Der Verlauf der Wechselfspannung

In Abb. 52 ist der Verlauf der induzierten EMK aufgezeichnet. Es genügt zur Veranschaulichung die Darstellung einer Leiterschleife der Spule, deren Anfang A bei  $0^\circ$  und deren Ende E bei  $180^\circ$  liegen. Wir wollen den Verlauf des Leiteranfangs A verfolgen. A beschreibt während der Umdrehung der Spule einen Kreisumfang. Ein voller Kreisumfang entspricht einem Winkel von  $360^\circ$ , ein halber von  $180^\circ$  und ein viertel von  $90^\circ$ . Für die bessere Übersichtlichkeit wurde eine Einteilung von  $30^\circ$  zu  $30^\circ$  gewählt. Der Kreisumfang von  $360^\circ$  wird nun auf einer Geraden abgewickelt, er entspricht der Strecke  $U = d \cdot \pi$  (siehe Handbuch Band B 1). Diese Strecke wird entsprechend der Gradeinteilung in 12 gleiche Strecken eingeteilt.

Über dem Nullpunkt errichtet man die Senkrechte bzw. vom Nullpunkt fällt man das Lot. Auf der Senkrechten werden die positiven auf dem Lot die negativen Werte der induzierten EMK abgetragen. Dabei geben die Höhen des Leiters über oder unter der neutralen Zone die zu übertragenden Maße an. Die Abwicklung des Leiteranfangs A ergibt die Kurve im

rechten Teil der Abb. 52, die damit den Verlauf der Wechselfspannung veranschaulicht. Die Kurve heißt auf Grund mathematischer Zusammenhänge Sinuskurve (siehe Band B 1).



(Abb. 52)

### b) Der Leiter schneidet die Kraftlinien

Der Leiteranfang A befindet sich bei  $0^\circ$  noch im Ruhezustand, die induzierte Spannung ist gleich Null. Bei Beginn der Kreisbewegung schneidet der Leiter die Kraftlinien des Magnetfeldes, so daß in ihm eine Spannung induziert wird, die mit Hilfe des um den Leiter liegenden Feldes in ihrer Richtung bestimmt werden kann. Die Größe der Spannung ist nach Kapitel A III abhängig:

1. von der Leiterlänge  $l$ , die durch die Spulenwindungszahl gegeben ist,
2. von der magnetischen Induktion  $B$ , die mit Hilfe der Erreger-spannung (bei Elektromagneten) vergrößert oder verringert werden kann,
3. von der Geschwindigkeit  $v$  der Feldänderung, in unserem Fall also von der Geschwindigkeit, mit der der Leiter die Kraftlinien schneidet.

### c) Die Feldänderung

Die Feldänderung ist trotz der gleichbleibenden Geschwindigkeit der Spule nicht an allen Punkten gleich groß.

Verfolgen wir den Weg des Leiters in Abb. 52. Von  $0^\circ$  bis  $30^\circ$  verläuft der Weg spitz zu den Kraftlinien, es werden nur wenige geschnitten. Von  $60^\circ$  bis  $90^\circ$  verläuft der Weg fast senkrecht zu den Kraftlinien, im Punkt  $90^\circ$  sogar genau senkrecht. Dadurch werden hier mehr Kraftlinien geschnitten. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich:

1. In den Punkten  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $360^\circ$  liegt der Leiter parallel zu den Kraftlinien, es werden keine Kraftlinien geschnitten, damit ist die induzierte EMK gleich Null.
2. In den Punkten  $90^\circ$  und  $270^\circ$  werden die meisten Kraftlinien geschnitten, die EMK erreicht hier ihren höchsten Wert.

#### d) Die Periode und die Frequenz

Aus dem Spannungsverlauf nach Abb. 52 ist zu erkennen, daß bei der Umdrehung der Spule eine positive und eine negative Spannungs-Halbwelle entsteht. Die beiden Halbwellen ergeben zusammen eine Periode.

Die Anzahl der Perioden in der Sekunde bezeichnet man als **Frequenz**  $f$ , sie wird in Hertz<sup>1)</sup> Hz gemessen:

Die Frequenz  $f$  ist die Anzahl der Perioden während einer Sekunde und wird in Hertz gemessen.

Der Wert 1 Hertz ist sehr klein. Man rechnet deshalb mit Kilohertz (1 kHz = 1000 Hz) und Megahertz (1 MHz = 1000000 Hz).

In Deutschland hat der Netzwechselstrom eine Frequenz von **50 Hz**, das sind 50 Perioden in der Sekunde oder 100 Halbwellen je Sekunde.

### 3. Die Frequenz und die Anzahl der Polpaare

Wenn wir in unserer Versuchsanordnung nach Abb. 51 einen Wechselstrom von 50 Hz erzeugen wollen, müssen wir die Spule 50mal in der Sekunde drehen, das sind in der Minute  $50 \cdot 60 = 3000$ mal. Unser Magnet hat 2 Pole, das ist ein **Polpaar**.

Hätte unsere Anordnung 2 Polpaare (4 Pole), so würden bei einer Umdrehung der Spule 2 Perioden entstehen. Wenn wir jetzt wiederum einen Wechselstrom von 50 Hz erzeugen wollen, müßten wir die Spule nur  $50 : 2 = 25$ mal in der Sekunde und in einer Minute nur  $\frac{50 \cdot 60}{2} = 1500$ mal drehen.

<sup>1)</sup> Heinrich Hertz, deutscher Physiker, 1857—1894

Zur Errechnung der **Umdrehungszahl** der Wechselstrommaschine multipliziert man die Frequenz  $f$  mit 60 und teilt das Produkt durch die Anzahl der Polpaare  $p$ :

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Aus dieser Formel läßt sich durch Umstellung die Frequenz  $f$  zu

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

und die Zahl der Polpaare zu

$$p = \frac{f \cdot 60}{n}$$

errechnen.

### 4. Effektiv- und Maximalwerte

In der Wechselspannungskurve nach Abb. 52 ergeben sich zwei Höchstwerte, ein positiver und ein negativer. Diese Werte nennt man auch **Maximalwerte** (maximum kommt aus dem Lateinischen und heißt höchst).

Wird bei Wechselstrommessungen ein Strom- oder Spannungsmesser verwendet, zeigen diese Instrumente die Maximalwerte nicht an, weil das Meßwerk wegen seiner Trägheit dem schnellen Wechsel der Spannungs- bzw. Stromrichtung nicht gewachsen ist. Das Meßwerk stellt sich auf einen Mittelwert ein, der dem Gleichstrom entspricht, der an einem Ohmschen Widerstand die gleiche Wärme erzeugen würde wie der Wechselstrom. Eine 220-Volt-Glühlampe kann genauso gut an Gleich- wie an Wechselstrom angeschlossen werden und hat bei beiden Stromarten den gleichen Wärmeeffekt. Die Leistung des Gleichstroms errechnet sich zu  $P = I^2 \cdot R$ , sie entspricht damit dem Quadrat des Stromwertes. Ebenso muß der effektgleiche, der **Effektivwert** des Wechselstromes ein quadratischer Mittelwert der gesamten Stromkurve sein.

Das Quadrat der effektiven Stromstärke  $I_{\text{eff}}^2$  ist gleich dem halben Quadrat der maximalen Stromstärke  $I_{\text{max}}^2$ :

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{I_{\text{max}}^2}{2}$$

Um  $I_{\text{eff}}$  zu bekommen, muß aus dem ganzen Wert die Wurzel gezogen werden (Wurzelziehen ist im Band B 1 beschrieben):

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{I_{\text{max}}^2}{2}$$

daraus folgt

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$\sqrt{2}$  ist gleich 1,414; damit wird

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{1,414} \text{ und da } \frac{1}{1,414} = 0,707 \text{ ist, wird}$$

$$I_{\text{eff}} = 0,707 \cdot I_{\text{max}} \text{ und } I_{\text{max}} = 1,414 \cdot I_{\text{eff}}$$

Ebenso ergibt sich der Wert für die Spannung:

$$U_{\text{eff}} = 0,707 \cdot U_{\text{max}} \text{ und } U_{\text{max}} = 1,414 \cdot U_{\text{eff}}$$

### 1. Beispiel:

Ein Voltmeter zeigt eine Wechselspannung von 220 Volt an. Wie hoch ist der Maximalwert der gemessenen Spannung?

**Gegeben:**  $U_{\text{eff}} = 220 \text{ V}$

**Gesucht:**  $U_{\text{max}}$

**Lösung:**  $U_{\text{max}} = 1,414 \cdot U_{\text{eff}} = 311 \text{ V}$

### 2. Beispiel:

Ein Wechselstrom hat den Maximalwert von 3,8 Ampere. Wie groß ist sein Effektivwert?

**Gegeben:**  $I_{\text{max}} = 3,8 \text{ A}$

**Gesucht:**  $I_{\text{eff}}$

**Lösung:**  $I_{\text{eff}} = 0,707 \cdot I_{\text{max}} = 0,707 \cdot 3,8 = 2,7 \text{ A}$

## 5. Übungsaufgaben

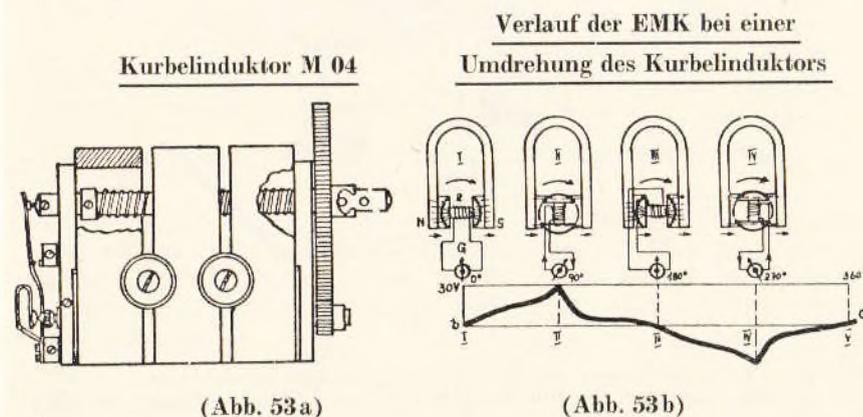
a) Zeichne die Entstehung einer Wechselspannung auf! b) Von welchen Faktoren ist die erzeugte Wechselspannung abhängig? c) Was versteht man unter der Frequenz eines Wechselstromes? d) Welche Frequenz hat der technische Wechselstrom in Deutschland? e) Wieviel Polpaare muß ein Wechselstromgenerator haben, der 50 Hz erzeugen soll und mit einer Drehzahl von 600 U/min arbeitet. f) Wie groß sind die Effektivwerte, wenn in einem Stromkreis die Höchstwerte mit 311 Volt und 2,7 Ampere gemessen worden sind. g) Wie groß ist der Maximalwert der Steuerspannung einer Verstärkerröhre, wenn an das Gitter eine Wechselspannung von 2,5 Volt gelegt wird?

## II. Spannungserzeuger

### 1. Der Kurbelinduktor

Der einfachste Wechselspannungserzeuger ist der heute in der Fernmelde-technik noch verwendete **Kurbelinduktor**. Die Versuchsanordnung nach Abb. 51 entspricht bereits im wesentlichen der Wirkungsweise eines Kurbelinduktors.

In Abb. 53a ist der Aufbau des Kurbelinduktors nochmals schematisch dargestellt. Zwischen den kreisförmigen Polschuhen eines Hufeisen-

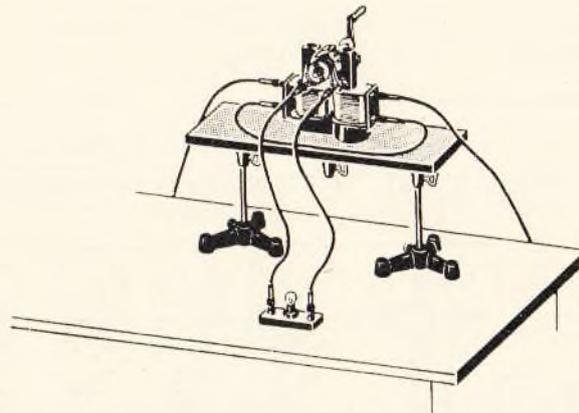


magneten ist ein Doppel-T-Anker drehbar angeordnet. Zur Vermeidung von Wirbelströmen ist der Anker aus papierisolierten Eisenblechen zusammengesetzt. Auf den Steg des Doppel-T-Ankers ist die Spule gewickelt, die etwa 2000 Windungen bei einer Drahtstärke von 0,2 mm hat. Die induzierte Spannung wird über einen Dorn und eine Schleiffeder abgenommen.

Um eine möglichst große Geschwindigkeit  $v$  der Kraftfeldänderung zu erreichen, wird der Doppel-T-Anker über einen Zahnradantrieb bewegt, der ein Übersetzungsverhältnis von 1:7 hat (bei älteren Modellen 1:5). Bei normaler Drehung der Kurbel (dreimal in der Sekunde) wird eine Wechselspannung von  $3 \cdot 7 = 21 \text{ Hz}$  erzeugt. Die Spannung beträgt etwa 35 Volt, ihr Verlauf weicht von der Form der Sinuskurve in Abb. 52 stark ab. Die Kurve des Spannungsverlaufs für den Kurbelinduktor ist aus der Abb. 53b zu ersehen.

## 2. Generatoren

Generatoren sind maschinelle Spannungserzeuger, die immer nach dem Prinzip der sich im Magnetfeld drehenden Spule arbeiten. Das Magnetfeld wird nicht wie beim Kurbelinduktor durch einen Dauermagneten, sondern durch einen Elektromagneten erzeugt. Zur Demonstration soll nochmals ein Versuch nach dem Muster der Abb. 51 durchgeführt werden. Diesmal wollen wir jedoch statt des Hufeisen-Dauer-Magneten einen



(Abb. 54)

Elektromagneten verwenden. In Abb. 54 sind die beiden Spulen deutlich zu erkennen. Zum Nachweis der erzeugten Spannung bedienen wir uns eines Glühlämpchens. Das Lämpchen blitzt während einer langsamen Umdrehung des Ankers zweimal auf. Wir haben hier einen Generator mit einem Polpaar (siehe Abschnitt B I 3). Bei schneller werdender Drehung des Ankers geht das Aufblitzen des Lämpchens in ein Flimmern und schließlich in ein Dauerleuchten über. Die Vorgänge sind im Abschnitt B I ausführlich behandelt worden.

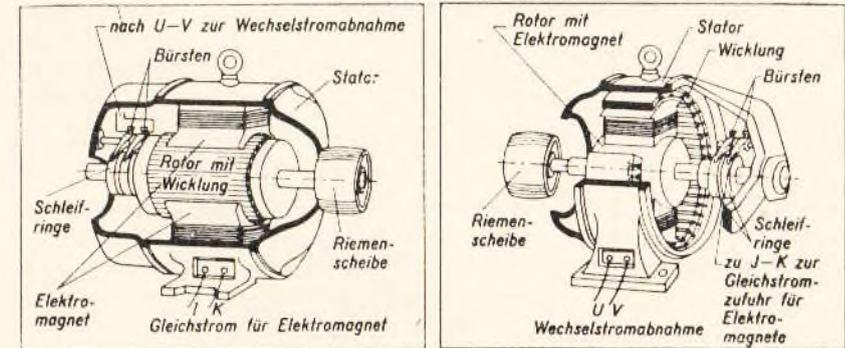
### a) Der Wechselstromgenerator

Bei den Wechselstromgeneratoren unterscheidet man zwischen **Außenpol- und Innenpolmaschinen**, je nachdem, ob die Elektromagnete im Ständer (Stator), also außen, oder auf dem Läufer (Rotor) also innen angeordnet sind.

Die Abb. 55 zeigt eine Außenpolmaschine (55a) und eine Innenpolmaschine (55b).

Bei **Außenpolmaschinen** wird die Wechselspannung über Schleifringe abgenommen. Der zur Erregung des Elektromagneten erforderliche Gleichstrom wird der Wicklung im Magnetgestell zugeführt. Der Läufer (Rotor) wird durch eine Turbine, eine Dampfmaschine oder einen Diesel-

### Der Wechselstromgenerator



a) Außenpolmaschine

b) Innenpolmaschine

(Abb. 55)

motor angetrieben. Die Außenpolmaschine ist die erste zur Erzeugung von Wechselstrom hergestellte Maschine. Bei der Erzeugung höherer Spannungen und Ströme ist die Abnahme über Schleifringe wegen zu starker Funkenbildung zu unzulänglich. Deshalb konstruierte man die Innenpolmaschine.

Bei der **Innenpolmaschine** liegt die Wicklung im Ständer still, während der Elektromagnet rotiert. Bei dieser Konstruktion braucht nur die niedrige Spannung für die Erregung des Elektromagneten über Schleifringe zugeführt zu werden. Der hochgespannte Wechselstrom kann über ein Klemmbrett am Ständer abgenommen werden.

### b) Gleichstromgeneratoren

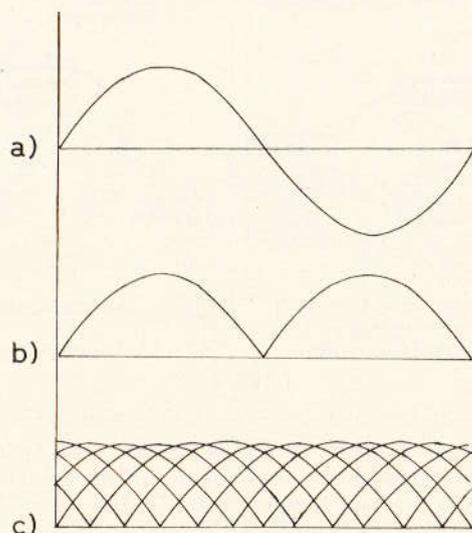
Der Aufbau eines Gleichstromgenerators ähnelt dem eines Gleichstrommotors, wie er im Abschnitt A V 3 beschrieben worden ist. Der bekannte Stromwender oder Kollektor wendet die Spannung in der neutralen Zone, so daß sich ein pulsierender Gleichstrom nach Abb. 56b ergibt. Durch Erhöhung der Spulenzahl wird dieser grob pulsierende Gleichstrom verbessert. Je mehr Spulen verwendet werden, um so glatter wird die erzeugte Gleichspannung (Abb. 56c).

Früher mußte der Elektromagnet des Gleichstromgenerators durch eine Batterie (Akku) erregt werden. Nach einer Erfindung Werner von Siemens<sup>1)</sup> wird in der Ankerwicklung selbst eine Spannung induziert, die

<sup>1)</sup> Werner von Siemens, 1816–1892

zur Erregung des Elektromagneten ausreicht. Der Vorgang wird elektrodynamisches Prinzip genannt. Er soll hier nicht näher erläutert werden. Nur so viel sei gesagt: Seine Entdeckung legte den Grundstein zur Ausnutzung der Elektrizität in großem Umfang.

### Pulsierender Gleichstrom

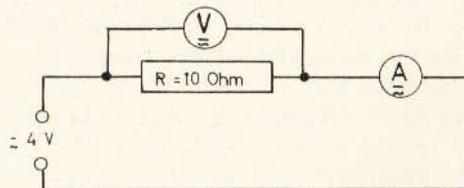


(Abb. 56)

## III. Wechselstromwiderstände

### 1. Der Ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis

Wir wollen in einem Versuch nach dem Schema der Abb. 57 einen Ohmschen Widerstand in einem Gleich- und einem Wechselstromkreis untersuchen. Bei Anlegen einer Gleichspannung von 4 Volt stellt sich



(Abb. 57)

eine Stromstärke von 0,4 Ampere ein; das ergibt nach dem Ohmschen Gesetz einen Widerstand von

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4}{0,4} = 10 \text{ Ohm}$$

Wenn wir jetzt statt der Gleich- eine Wechselspannung der gleichen Höhe anlegen, so lesen wir an den ebenfalls auf Wechselstrom umgestellten Instrumenten die gleichen Werte ab wie vorher:  $U = 4 \text{ V}$ ,  $I = 0,4 \text{ A}$ , das ergibt einen Widerstand von ebenfalls  $R = 10 \text{ Ohm}$ . Damit haben wir festgestellt:

Der rein Ohmsche Widerstand einer Spule bleibt für Gleich- und Wechselstrom gleich groß.

Alle Berechnungen an Ohmschen Widerständen in Wechselstromkreisen können also mit den für Gleichstrom gültigen Formeln und Gesetzen durchgeführt werden, wenn dabei die von den Meßinstrumenten angezeigten Effektivwerte eingesetzt werden.

### Beispiel:

Wie groß ist der Widerstand einer Glühlampe für 60 Watt und 220 V, wenn sie an eine Wechselspannung von 220 V angeschlossen wird? Wie groß ist der durch die Glühlampe fließende Strom?

Gegeben:  $U = 220 \text{ V}$   $P = 60 \text{ W}$

Gesucht:  $I$   $R$

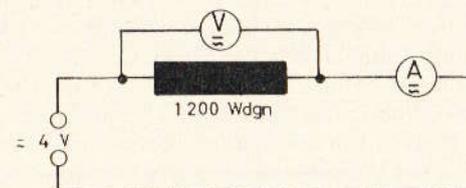
Lösung:  $P = U \cdot I$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0,273 \text{ A} = 273 \text{ mA}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0,273} = 806 \Omega$$

### 2. Die Spule im Wechselstromkreis

Das Schema des Versuchs nach Abb. 58 ist das gleiche wie in der Abb. 57, den Ohmschen Widerstand haben wir natürlich gegen eine Spule mit 1200 Windungen ausgetauscht und den Meßbereich des Voltmeters



(Abb. 58)

erweitert. Als anzulegende Spannung wählen wir 12 Volt. Die Ergebnisse fassen wir zusammen:

a) Gleichstrom:

$$U = 12 \text{ V} \quad I = 1,2 \text{ A} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{12}{1,2} = 10,0 \Omega$$

b) Wechselstrom, Spule ohne Eisenkern:

$$U = 12 \text{ V} \quad I = 0,64 \text{ A} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,64} = 18,8 \Omega$$

c) Wechselstrom, Spule mit Eisenkern:

$$U = 12 \text{ V} \quad I = 0,18 \text{ A} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,18} = 66,7 \Omega$$

Aus der Zusammenstellung ersehen wir:

- a) Die Spule hat einen verhältnismäßig kleinen Gleichstromwiderstand.
- b) Bei Wechselstrom ist der Widerstand höher, die Spule hat einen hohen Wechselstromwiderstand.
- c) Der Wechselstromwiderstand wird größer mit zunehmender Induktivität der Spule.

a) Wirk-, Schein- und Blindwiderstand

Der Gleichstromwiderstand der Spule ist gleich dem Ohmschen Widerstand, der durch die Länge des Spulendrahtes gegeben ist. Bei Stromdurchgang durch die Spule erwärmt sich der Spulendraht. Der Widerstand zeigt wie jeder andere Ohmsche Widerstand eine **Wärmewirkung**. Man nennt deshalb den Ohmschen Widerstand einer Spule auch **Wirkwiderstand**.

Wird die Spule in einen Wechselstromkreis eingeschaltet, so ist neben dem Wirkwiderstand noch ein weiterer Widerstand vorhanden. Seine Größe ist von der Induktivität der Spule abhängig, wie wir aus unserer Zusammenstellung ablesen können ( $R$  unter b) =  $18,8 \Omega$   $R$  unter c) =  $66,7 \Omega$ ). Nach unseren Erkenntnissen über die Selbstinduktion (Abschnitt A IV) wird mit steigender Induktivität der Stromdurchfluß durch die Spule geringer, wie wir es ebenfalls in unserer Zusammenstellung bestätigt finden. Bei der Berechnung des Spulenwiderstandes nach dem Ohmschen Gesetz (mit den Werten für die Spannung und den Strom aus der Zusammenstellung) ist der Widerstand der Spule **scheinbar** größer geworden. Da der Ohmsche Widerstand durch die Leiterlänge jedoch festliegt (abgesehen von der Erwärmung des Leiters), muß in dem errechneten

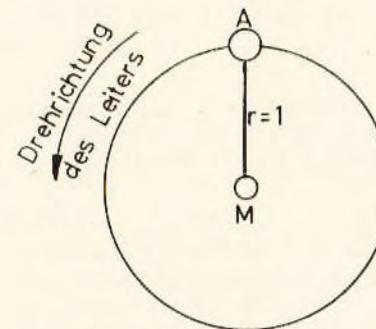
**Scheinwiderstand** außer dem Wirkwiderstand noch ein anderer nicht sichtbarer Widerstand enthalten sein, der von der Induktivität der Spule abhängig ist.

Diesen von der Induktivität abhängigen Widerstand nennt man deshalb auch **induktiven Widerstand** oder **Blindwiderstand**. Seine Größe ist außer von der Induktivität auch noch von der Frequenz des Wechselstromes abhängig. Würde man beim Versuch nach Abb. 58 die Netzfrequenz von 50 auf 100 Hz erhöhen, so würde auch der induktive Widerstand doppelt so groß werden. Für den induktiven Widerstand  $R_L$  gilt also:

Der induktive Widerstand  $R_L$  steigt mit der Induktivität  $L$  und der Frequenz  $f$ .

b) Die Kreisfrequenz

In Abb. 52 ist die Frequenz des Wechselstromes durch die Bewegung einer Leiterschleife auf einem Kreisumfang dargestellt worden. Dabei legt der Leiter bei einer Umdrehung von  $360^\circ$  den Weg  $U = d \cdot \pi$  zurück. Wählen wir für den Kreis den Radius  $r = 1$  (Einheitskreis), so wird  $U = d \cdot \pi = 2 \cdot \pi$  ( $\pi = 3,14$ ). Nun entspricht eine Umdrehung je Sekunde einer Periode je Sekunde oder der Frequenz 1 Hertz. Bei 2 Umdrehungen



(Abb. 59)

je Sekunde wird der zurückgelegte Weg doppelt so lang,  $U = 2 \pi \cdot 2$ ; das entspricht einer Frequenz  $f = 2$  Hz. Bei  $f$  Umdrehungen oder bei einer Frequenz von  $f$  Hz wird  $U = 2 \pi \cdot f$ . Diesen Ausdruck nennt man **Kreisfrequenz** und bezeichnet sie mit dem griechischen Buchstaben  $\omega$  (omega). Die Kreisfrequenz ist also:

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

**Beispiel:**

In Deutschland hat der Netzwechselstrom eine Frequenz von 50 Hz. Wie groß ist die Kreisfrequenz?

**Gegeben:**  $f = 50 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $\omega$

**Lösung:**  $\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$

**c) Induktiver Widerstand und Frequenz**

Wir haben bereits erkannt, daß der induktive Widerstand mit der Induktivität der Spule und mit der Frequenz steigt. Zur Berechnung des induktiven Widerstandes bedient man sich der Formel:

$$R_L = 2\pi f \cdot L$$

$R_L$  ergibt sich in Ohm, wenn  $L$  in Henry und  $f$  in Hertz eingesetzt werden.

**1. Beispiel:**

Wie groß ist der induktive Widerstand einer Spule mit der Induktivität  $L = 0,08 \text{ H}$  bei einer Netzfrequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$ ?

**Gegeben:**  $L = 0,08 \text{ H}$        $f = 50 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $R_L$

**Lösung:**  $R_L = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,08 = 25,1 \Omega$

**2. Beispiel:**

Eine Spule hat bei einer Frequenz von  $f = 1 \text{ kHz}$  einen induktiven Widerstand  $R_L = 34,54 \text{ Ohm}$ . Wie groß ist die Induktivität der Spule?

**Gegeben:**  $R_L = 34,54$        $f = 1000 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $L$

**Lösung:**  $L = \frac{R_L}{2\pi f} = \frac{34,54}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000} = 0,0055 \text{ H} = 5,5 \text{ mH}$

**3. Beispiel:**

Bei welcher Frequenz hat eine Spule von  $350 \text{ mH}$  einen induktiven Widerstand von  $110 \text{ Ohm}$ ?

**Gegeben:**  $L = 0,35 \text{ H}$        $R_L = 110$

**Gesucht:**  $f$

**Lösung:**  $f = \frac{R_L}{2\pi L} = \frac{110}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,35} = 50 \text{ Hz}$

**d) Die Drosselspule**

Der Wirkwiderstand einer Spule bewirkt eine Erwärmung und damit einen Leistungsverlust. Der induktive Widerstand dagegen hat keine äußere Verlustwirkung. Die abfallende Spannung wird nicht in Wärme-

energie umgewandelt, sondern sie wird von der entstehenden GEMK (siehe hierzu auch Abschnitt A IV) aufgehoben oder gedrosselt. Die Spannung kann um so verlustloser abgedrosselt werden, je kleiner der Ohmsche Widerstand der Spule gehalten wird und je größer der induktive Widerstand ist, z. B. durch **Eisenschluß**.

Spulen, mit deren Hilfe man die Spannung oder den Strom im Wechselstromkreis verringern kann, nennt man **Drosselspulen**. Der induktive Widerstand einer Drosselspule kann eingestellt werden, indem man den Eisenschluß der Spule verändert. Bekanntlich ist die Größe des induktiven Widerstandes von der Induktivität und diese vom Eisenschluß abhängig. Die Induktivität und der induktive Widerstand einer Drosselspule werden dadurch verkleinert, daß man mit Hilfe eines Luftspalts im Eisenkreis der Spule den magnetischen Kraftlinienfluß schwächt. Wir erkennen:

**Der induktive Widerstand ist um so kleiner, je größer der Luftspalt ist.**

In der Starkstromtechnik verwendet man statt des Ohmschen Widerstandes, der immer einen hohen Leistungsverlust bewirkt, in den meisten Fällen eine Drosselspule. In der Fernmeldetechnik werden Drosselspulen u. a. verwendet als sogenannte Netzdrosseln zum Unterdrücken von Störschwingungen, als Drosselketten zum Sperren hoher oder zum Ausziehen niedriger Frequenzen, in Schwingungskreisen und als Vergleichsinduktivität für Meßzwecke.

**e) Die Phasenverschiebung**

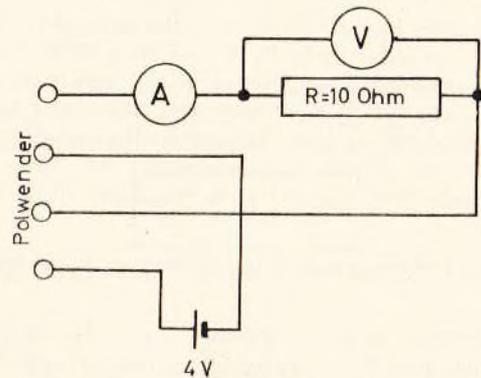
Wir wollen zunächst untersuchen, wie sich Strom und Spannung an einem rein Ohmschen Widerstand verhalten. Wir bedienen uns dabei des Versuchs nach Abb. 60.

An einen Polwender legen wir einmal eine Gleichspannung von  $4 \text{ Volt}$  und zum anderen einen Festwiderstand von  $10 \Omega$ , in dessen Stromkreis ein Amperemeter geschaltet ist. Ein Voltmeter liegt außerdem parallel zum Widerstand. Die Meßinstrumente eichen wir so, daß ihre Zeiger in Mittelstellung stehen.

Durch die Verwendung des Polwenders können wir einen Strom wechselnder Richtung erzeugen. Die Kurbel des Polwenders drehen wir etwa 3- bis 4mal in der Sekunde herum. Eine Umdrehung der Kurbel entspricht einem Winkel von  $360^\circ$ . Während einer Umdrehung ergibt sich also eine Spannungskurve nach der Abb. 52.

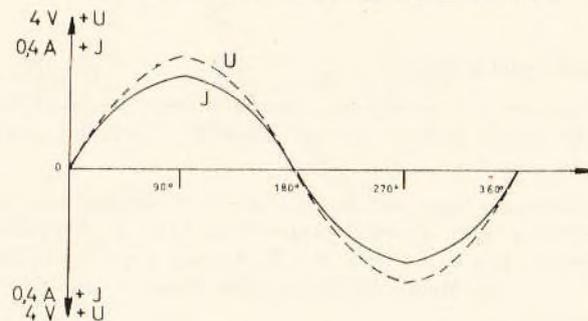
Beobachten wir beide Meßinstrumente zu gleicher Zeit, so stellen wir fest, daß bei einer Umdrehung der Kurbel beide Zeiger im gleichen Augenblick den vollen Ausschlag in gleicher Richtung zeigen, zugleich durch den Nullpunkt gehen und wiederum zur gleichen Zeit den vollen Aus-

schlag in der entgegengesetzten Richtung anzeigen. Tragen wir in einem Schaubild auf der Waagerechten die Umdrehung des Polwenders auf und auf der Senkrechten die Werte für Strom und Spannung, so erhalten wir eine Strom- und eine Spannungskurve nach Abb. 61. Wir erkennen,



(Abb. 60)

#### Phasenlage am Ohmschen Widerstand



(Abb. 61)

abgesehen von den Höchstwerten, den gleichen Verlauf beider Kurven; man sagt, sie haben die gleiche Phasenlage. Aus der Abb. 61 und aus dem vorher Gesagten können wir ableiten:

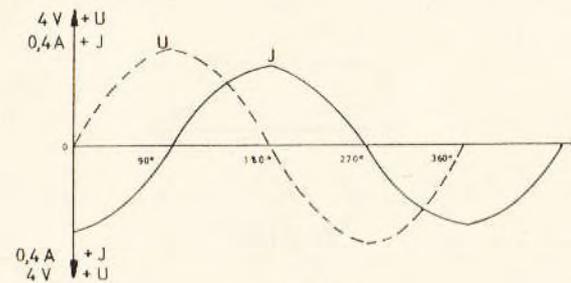
**Bei einem rein Ohmschen Widerstand im Wechselstromkreis liegen die Werte für den Strom und die Spannung zeitlich gleich, sie liegen in derselben Phase.**

Nun wollen wir statt des Ohmschen Widerstandes eine Spule mit 1200 Windungen und einem vollen Eisenkern in den Stromkreis schalten. Während wir den Polwender drehen, beobachten wir wieder beide Meßinstrumente und stellen dabei fest, daß das Voltmeter sofort den vollen Spannungswert bzw. den Nullwert anzeigt, während der Höchstwert bzw. der Nullwert des Stromes erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird. Aus diesem Vorgang können wir ableiten:

**Bei einem induktiven Widerstand im Wechselstromkreis eilt der Strom der Spannung nach.**

Tragen wir den Verlauf der Spannung ihren Werten nach in einem Schaubild auf, so ergibt sich eine Kurve, wie wir sie auch in Abb. 61 schon gehabt haben. Der Strom hat seinen Nullwert erst nach einer Vierteldrehung des Polwenders erreicht, deshalb müssen wir seinen Nulldurchgang um  $90^\circ$  nach rechts verlegen. Ebenso ist der Höchstwert des Stroms um  $90^\circ$  nach rechts zu verlegen. Aus den beiden Kurven nach Abb. 62 ist zu erkennen, daß der Strom und die Spannung nicht mehr

#### Phasenlage am induktiven Widerstand



(Abb. 62)

die gleiche Phasenlage haben, sondern daß sich die Phasenlage um  $90^\circ$  verschoben hat.

**Bei einem rein induktiven Widerstand in einem Wechselstromkreis tritt infolge der Nacheilung des Stromes gegen die Spannung eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  auf.**

Jetzt wollen wir bei unserem Versuch das Joch des Eisenkerns entfernen und den Versuch wiederholen. Die Nacheilung des Stromanzeigers ist kleiner geworden; sie tritt kaum noch in Erscheinung, sobald der gesamte Eisenkern entfernt ist. Wir haben also den induktiven Widerstand ver-

ringert, während der Wirkwiderstand gleich geblieben ist. Das Verhältnis des induktiven zum Wirkwiderstand wird kleiner und damit auch die Phasenverschiebung:

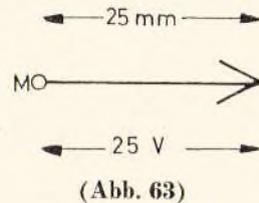
**Die Größe der Phasenverschiebung ist abhängig von dem Verhältnis des induktiven Widerstandes zum Wirkwiderstand.**

Nach unseren Beobachtungen kann also der Winkel der Phasenverschiebung Werte zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  haben. **Der Phasenwinkel muß jedoch immer kleiner als  $90^\circ$  sein, weil jede Spule neben dem induktiven einen Wirkwiderstand hat.** Der Winkel der Phasenverschiebung oder kurz **Phasenwinkel** wird mit dem griechischen Buchstaben  $\varphi$  (sprich phi) bezeichnet.

#### f) Die Berechnung der Widerstandswerte einer Spule

##### aa) Zeiger- und Liniendiagramme

Die Werte für den Strom und die Spannung kann man auch als Strecken oder Zeiger (Vektoren) darstellen. Dabei ist die Länge des Zeigers der Größe der Strom- und Spannungswerte entsprechend in einem bestimmten Maßstab aufzutragen. Sollen z. B. 25 V als Zeiger dargestellt werden, so entsprechen, wie in Abb. 63 gezeigt, bei einem Maßstab von 1 mm für 1 V, 25 mm gleich 25 V.

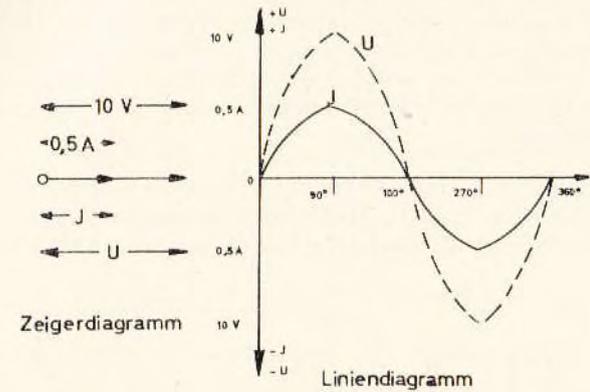


Grundsätzlich ist festgelegt, den Zeiger um den Mittelpunkt M links herum kreisen zu lassen (siehe auch Abb. 59). Dabei erhält man durch die Abwicklung des Weges, den der Pfeil zurücklegt ( $U = d \cdot \pi$ ) auf einer Geraden wiederum die Wechselspannungskurve nach der Abb. 52.

Beim **rein Ohmschen Widerstand** liegen der Strom und die Spannung in Phase, sie erreichen also zu gleicher Zeit den Nullpunkt und den Höchstwert. Im Zeigerdiagramm liegen deshalb beide Zeiger in der gleichen Richtung. Läßt man beide Zeiger linksherum drehen, so erhält man bei Abwicklung der Zeigerwege die in Phase liegenden Kurven nach Abb. 64. Wir wählen einen Maßstab von  $1 \text{ V} = 2 \text{ mm}$  und  $0,1 \text{ A} = 2 \text{ mm}$ , und wir legen dem Diagramm die Werte  $U = 10 \text{ V}$  und  $I = 0,5 \text{ A}$  zugrunde.

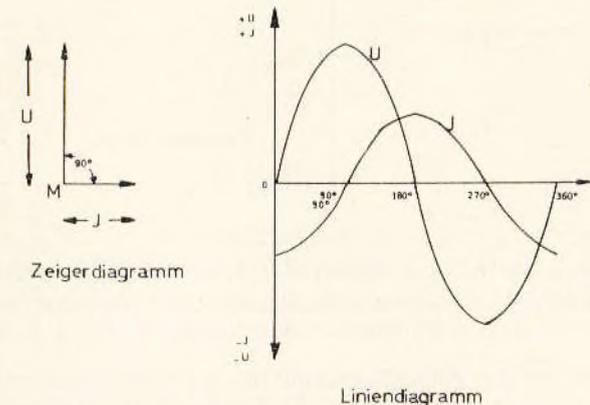
Bei **rein induktivem Widerstand** (unter Vernachlässigung des der Spule zugehörigen Wirkwiderstandes) eilt die Spannung dem Strom um  $90^\circ$

voraus. Der Spannungszeiger muß also  $90^\circ$  vor dem Stromzeiger liegen, er bildet einen Winkel von  $90^\circ$  zum Stromzeiger. Lassen wir nun wiederum



(Abb. 64)

beide Zeiger linksherum laufen, so muß sich ein Liniendiagramm nach Abb. 65 ergeben, wir haben zwischen der Strom- und der Spannungskurve eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$ . Für unsere Zeichnung nach



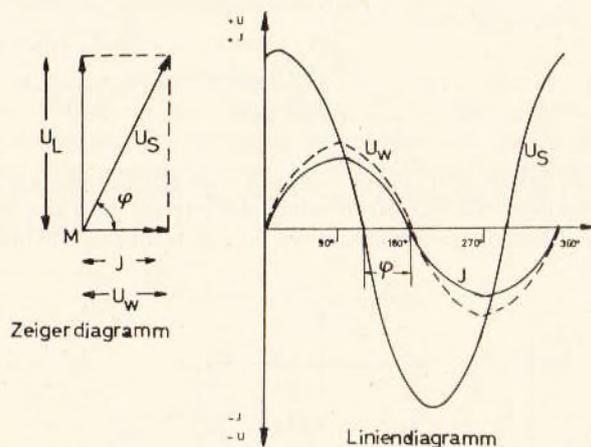
(Abb. 65)

Abb. 65 wählen wir die gleichen Werte und den gleichen Maßstab wie für die vorherigen Diagramme.

Berücksichtigen wir jetzt bei einer Spule den **Wirkwiderstand und den induktiven Widerstand**. Am Wirkwiderstand fällt die Spannung  $U_W$  und

am induktiven Widerstand die Spannung  $U_L$  ab.  $U_W$  und der Strom  $I$  sind in Phase, dagegen ist  $U_L$  um  $90^\circ$  vorausschlagend verschoben. Beide Widerstände zusammen bilden den Scheinwiderstand, an dem die Scheinspannung  $U_S$  abfällt. Die Scheinspannung ergibt sich als Diagonale des Parallelogramms, das wir aus  $U_W$  und  $U_L$  bilden können. Der Phasenwinkel  $\varphi$ , der durch den induktiven Widerstand der Spule verursacht wird, liegt zwischen der Wirkspannung  $U_W$  (bzw. dem Strom  $I$ ) und der Scheinspannung  $U_S$ .

Für unser Zeiger und Liniendiagramm wählen wir die Werte  $I = 0,5 \text{ A}$ ;  $U_W = 6 \text{ V}$  und  $U_L = 12 \text{ V}$ . Als Maßstab wählen wir  $1 \text{ V} = 2 \text{ mm}$  und  $1 \text{ A} = 2 \text{ mm}$ . Wir erhalten dann die Diagramme nach Abb. 66. Den Wert



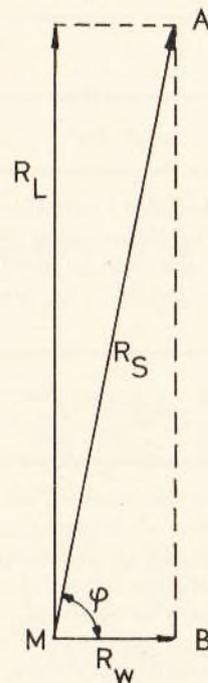
(Abb. 66)

für  $U_S$  können wir durch Abmessen der Strecke in der Zeichnung ermitteln, es ergibt sich eine Länge von  $26 \text{ mm} = 13 \text{ V}$ . Den Phasenwinkel können wir mit dem Winkelmesser ablesen, wir erhalten  $\varphi = 65^\circ$ .

Wir wollen nun ein **Zeigerdiagramm** für die Wechselstromwiderstände einer Spule aufzeichnen (Abb. 67). Wir können die Zeiger in der gleichen Weise anwenden, wie bei den Spannungsdiagrammen. Denn die Spannungen  $U_W$ ,  $U_L$  und  $U_S$  fallen ja an den entsprechenden Widerständen ab. Wir wählen die Werte  $R_W = 12 \Omega$  und  $R_L = 60 \Omega$ . Der Maßstab soll für  $1 \Omega = 1 \text{ mm}$  betragen. Nachdem wir aus  $R_W$  und  $R_L$  das Parallelogramm konstruiert haben, können wir den Wert für  $R_S$  ablesen und erhalten  $R_S = 61,2 \Omega$ . Den Phasenwinkel  $\varphi$  messen wir mit dem Winkelmesser zu  $\varphi = 78,5^\circ$ .

### bb) Rechnerische Bestimmung

Eine rechnerische Bestimmung der Widerstände können wir mit Hilfe des Dreiecks M-A-B der Abb. 67 durchführen. Dieses Dreieck hat bei B



(Abb. 67)

einen rechten Winkel ( $90^\circ$ ). Im rechtwinkligen Dreieck gilt der Lehrsatz des griechischen Mathematikers Pythagoras (siehe Band B 1):

**Die Summe der Kathetenquadrate ist gleich dem Hypotenusenquadrat ( $a^2 + b^2 = c^2$ ).**

Wenn wir den Lehrsatz des Pythagoras auf unser Widerstandsdreieck anwenden, so bekommen wir

$$R_S^2 = R_W^2 + R_L^2$$

Um  $R_S$  zu bekommen, müssen wir die Wurzel ziehen (siehe Band B 1) und erhalten dann:

$$R_S = \sqrt{R_W^2 + R_L^2}$$

Durch Umstellen der Ausgangsformel und durch nachfolgendes Wurzelziehen ergibt für den induktiven Widerstand:

$$R_L = \sqrt{R_S^2 - R_W^2}$$

und für den Wirkwiderstand:

$$R_W = \sqrt{R_S^2 - R_L^2}$$

Der Phasenwinkel  $\varphi$  wird durch das Verhältnis der beiden ihn einschließenden Seiten bestimmt. Das Verhältnis dieser Seiten zueinander nennt man den **Kosinus des Winkels  $\varphi$**  und schreibt  $\cos \varphi$  (Kosinus  $\varphi$ ) (über Winkelfunktionen siehe ebenfalls Band B 1). In Buchstaben ausgedrückt heißt das:

$$\cos \varphi = \frac{R_W}{R_S}$$

Haben wir nur einen Wirkwiderstand, so ist  $R_S = R_W$  und damit wird  $\cos \varphi = 1$ . Aus der Tabelle für Winkelfunktionen kann man bei  $\cos \varphi = 1$  einen Winkel  $\varphi = 0$  ablesen. Es ist also keine Phasenverschiebung vorhanden; diese Tatsache entspricht unseren bisherigen Feststellungen. Bei rein induktivem Widerstand wird  $R_S = R_L$  und damit  $R_W = 0$ . Wenn wir Null durch eine Zahl teilen, erhalten wir wieder Null. Somit wird also auch  $\cos \varphi = 0$ . Aus der Tabelle für Winkelfunktionen lesen wir ab für  $\cos \varphi = 0$  gilt der Winkel  $\varphi = 90^\circ$ . Zwischen den Werten Null und  $90^\circ$  liegen alle vorkommenden Werte von  $\cos \varphi$  und  $\varphi$ .

#### 1. Beispiel:

$R_W = 12 \Omega$   $R_L = 60 \Omega$  (Das sind die Werte aus den Diagrammen)

$$R_S = \sqrt{R_L^2 + R_W^2} = \sqrt{60^2 + 12^2} = \sqrt{3744} = 61,2 \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{R_W}{R_S} = \frac{12}{61,2} = 0,196; \text{ nach Tabelle } \varphi = 78,7^\circ$$

Wir erkennen, daß die Werte aus den Diagrammen fast genau mit den rechnerischen Werten übereinstimmen, besonders dann, wenn wir Millimeterpapier verwendet haben.

#### 2. Beispiel:

Eine Spule mit der Induktivität von 100 mH und einem Wirkwiderstand von  $9 \Omega$  ist an eine Wechselspannung von 85 V mit einer Frequenz von 50 Hz angeschlossen.

Wie groß sind die Widerstände der Spule und die Phasenverschiebung. Wie groß ist der Strom, der durch die Spule fließt?

**Gegeben:**  $L = 0,1 \text{ H}; R_W = 9 \Omega; U = 85 \text{ V}; f = 50 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $R_L, R_S, I$

**Lösung:**  $R_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \Omega$

$$R_S = \sqrt{R_W^2 + R_L^2} = \sqrt{9^2 + 31,4^2} = \sqrt{1067} = 32,7 \Omega$$

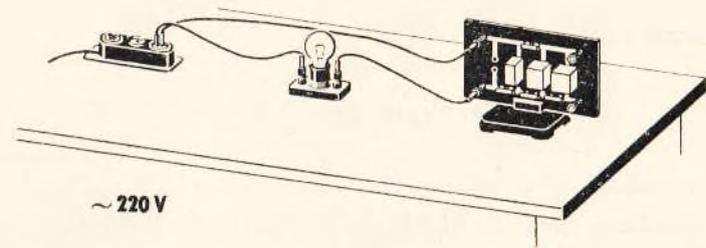
$$\cos \varphi = \frac{R_W}{R_S} = \frac{9}{32,7} = 0,275$$

$\varphi = \text{nach Tabelle } 74^\circ$

$$I = \frac{U}{R_S} = \frac{85}{32,7} = 2,6 \text{ A}$$

### 3. Der Kondensator im Wechselstromkreis

(Über den Kondensator im Gleichstromkreis siehe Band B 3).



(Abb. 68)

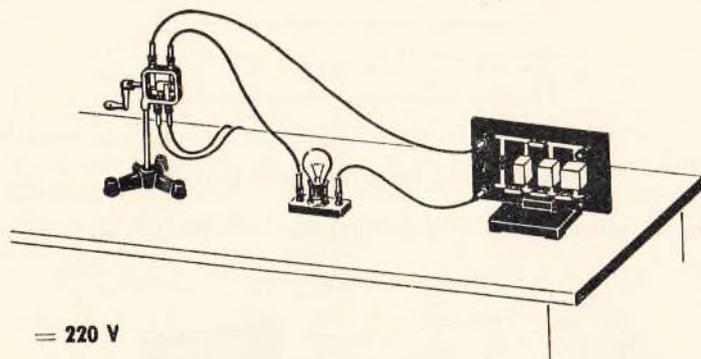
Wir wollen bei dem Versuch nach Abb. 68 eine Glühlampe nacheinander mit Kondensatoren von 2, 4, 6, 8 und  $10 \mu\text{F}$  in Reihe an das Lichtnetz (220 V) anschließen. Die Glühlampe leuchtet zunächst dunkler als normal. Bei Erhöhung der Kapazität wird das Leuchten zunehmend heller. Wir können aus diesem Vorgang erkennen:

**Der Kondensator läßt scheinbar Wechselstrom fließen. Der Strom steigt mit zunehmender Kapazität. Der Wechselstromwiderstand  $R_C$  eines Kondensators sinkt mit steigender Kapazität. Den Wechselstromwiderstand eines Kondensators nennt man kapazitiven Widerstand. Er steht zur Kapazität im umgekehrten Verhältnis:**

$$R_C = \frac{1}{C}$$

### a) Kapazitiver Widerstand und Frequenz

Der Versuch nach Abb. 69 soll uns zeigen, daß die Größe des kapazitiven Widerstandes neben der Kapazität auch noch von der Frequenz abhängig ist. In dem Augenblick, in dem wir an den Polwender die Gleich-



(Abb. 69)

spannung anlegen, blitzt die Glühlampe kurz auf und erlischt dann gleich wieder. Wir stellen fest:

#### ■ Der Kondensator sperrt den Gleichstrom.

Nun drehen wir den Polwender bei gleichbleibender Kapazität mal langsam und mal schneller. Beim langsamen Drehen leuchtet die Lampe dunkler als beim schnellen Drehen. **Der Stromfluß ist also bei hoher Frequenz größer als bei einer niedrigeren;** oder anders ausgedrückt, **der kapazitive Widerstand wird mit wachsender Frequenz geringer.** Auch in diesem Falle verhält sich der kapazitive Widerstand  $R_C$  umgekehrt wie die Frequenz  $f$ . In die Formel zur Errechnung des kapazitiven Widerstandes ist natürlich die Kreisfrequenz einzusetzen:

$$R_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Setzt man  $f$  in Hz und  $C$  in Farad ein, so erhält man  $R_C$  in Ohm.

### 1. Beispiel:

Wie groß ist der kapazitive Widerstand eines Kondensators von  $4 \mu\text{F}$  bei einer Frequenz von 50 Hz?

**Gegeben:**  $C = 0,000004 \text{ F}$   $f = 50 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $R_C$

$$\text{Lösung: } R_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{6,28 \cdot 50 \cdot 0,000004}$$

$$R_C = \frac{1}{0,001256} = \frac{1000000}{1256} = 796,2 \Omega$$

### 2. Beispiel:

In einen Wechselstromkreis mit der Frequenz  $f = 10 \text{ kHz}$  soll ein kapazitiver Widerstand von  $R_C = 6,4 \text{ k}\Omega$  eingeschaltet werden. Wie hoch muß die Kapazität des Widerstandes sein?

**Gegeben:**  $R_C = 6400 \Omega$   $f = 10000 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $C$

**Lösung:** Aus der Grundformel  $R_C = \frac{1}{2\pi f C}$  erhalten wir nach Umstellung

$$C = \frac{1}{2\pi f R_C} = \frac{1}{6,28 \cdot 10000 \cdot 6400}$$

$$C = \frac{1}{391920000} = 0,000000002552 \text{ F}$$

$$C = 2,55 \text{ nF (siehe auch Band B 3 unter HI 3)}$$

### 3. Beispiel:

Ein Kondensator hat bei einer Kapazität von  $80 \mu\text{F}$  einen kapazitiven Widerstand von  $40 \Omega$ . Welche Frequenz muß vorhanden sein?

**Gegeben:**  $C = 0,000080 \text{ F}$   $R_C = 40 \Omega$

**Gesucht:**  $f$

**Lösung:** Wir erhalten wiederum nach Umstellen der Grundformel:

$$f = \frac{1}{2\pi C R_C} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,00008 \cdot 40}$$

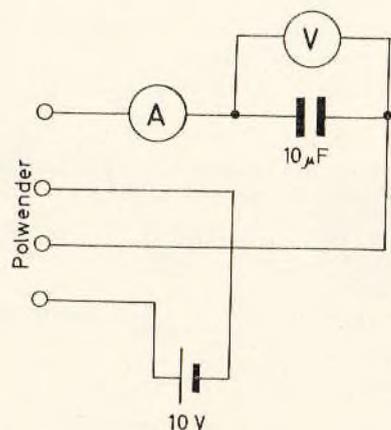
$$f = \frac{1}{0,020096} = \text{rd. } 50 \text{ Hz}$$

### b) Die Phasenverschiebung

Wir wollen jetzt in der Weise wie wir es in Abb. 60 mit einem rein Ohmschen und einem rein induktiven Widerstand bereits getan haben nach dem Schema der Abb. 70 die Phasenverschiebung bei einem rein kapazitiven Widerstand untersuchen. Wir drehen auch hier den Polwender langsam durch und beobachten dabei beide Meßinstrumente auf die zeitliche Folge ihrer Zeigeraus schläge. Der Zeiger des Amperemeters zeigt bereits den Höchstwert an, während der Zeiger des Spannungsmessers den Höchstwert noch nicht erreicht hat. Daraus erkennen wir:

■ **Bei einem kapazitiven Widerstand im Wechselstromkreis eilt der Strom der Spannung voraus.**

Bei genauer Beobachtung erkennen wir, daß vom Zeitpunkt des Erreichens des Stromhöchstwertes bis zum Erreichen des Spannungshöchstwertes die Kurbel des Polwenders um eine Vierteldrehung weitergedreht worden ist. Da eine volle Umdrehung einem Winkel von  $360^\circ$  entspricht, macht



(Abb. 70)

eine Vierteldrehung  $90^\circ$  aus. Aus unserer Beobachtung können wir folgern:

Bei einem rein kapazitiven Widerstand in einem Wechselstromkreis tritt infolge der Voreilung des Stromes gegen die Spannung eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  auf.

#### c) Zeiger und Liniendiagramm

Ein Kondensator hat einen kaum feststellbaren Wirkwiderstand. Deshalb kann man ihn vernachlässigen und jeden Kondensator als einen rein kapazitiven Widerstand behandeln, dessen Phasenwinkel  $\varphi$  immer  $90^\circ$  beträgt.

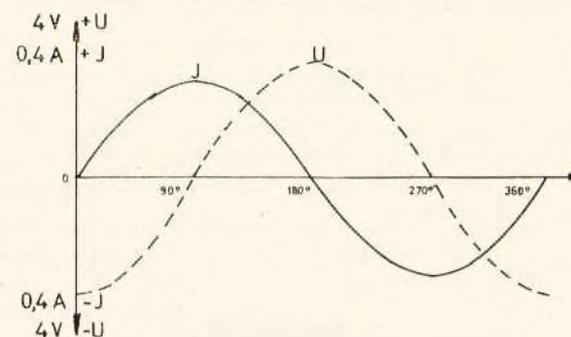
Dabei ist  $\cos \varphi$  immer gleich Null. Abb. 71 zeigt uns das Zeiger- und Liniendiagramm eines Kondensators.

Beim Kondensator ist also der Scheinwiderstand gleich dem kapazitiven Widerstand ( $R_s = R_c$ ). Damit ist die Berechnung des Scheinwiderstandes, des Wirkwiderstandes und des  $\cos \varphi$  nicht notwendig.

Aus unseren bisherigen Erkenntnissen über die Widerstände im Wechselstromkreis erkennen wir, daß der Ohmsche Widerstand stets frequenzunabhängig ist, während die Spule und der Kondensator als Widerstände anzusehen sind, deren Werte von der Frequenz abhängig sind.

Beim Ohmschen Widerstand entsteht keine Phasenverschiebung. Eine Spule und ein Kondensator haben eine Phasenverschiebung, die einander entgegengerichtet ist.

#### Phasenlage am kapazitiven Widerstand



(Abb. 71)

#### 4. Übungsaufgaben

a) Wie verhält sich ein rein Ohmscher Widerstand in einem Gleich- und in einem Wechselstromkreis? b) Warum unterscheidet man bei Glühlampen nicht nach solchen für Gleich- und Wechselstrom? c) Welche Widerstände hat eine Spule im Wechselstromkreis? d) Erkläre den Begriff „Induktiver Widerstand“! e) Was versteht man unter Kreisfrequenz? f) Wie heißt die Formel zur Errechnung des induktiven Widerstandes? g) Wie groß ist der induktive Widerstand einer Spule mit der Induktivität 20 mH bei einer Frequenz von 1000 Hz? h) Welche Aufgabe hat der Luftspalt bei einer Drosselspule? i) Wie verhalten sich Strom und Spannung bei einer Spule im Wechselstromkreis? k) Ermittle mit Hilfe eines Zeigerdiagramms den Scheinwiderstand und den Phasenwinkel einer Drosselspule, deren Wirkwiderstand 50 Ohm und deren induktiver Widerstand 150 Ohm beträgt! l) Löse die vorhergehende Aufgabe auf rechnerischem Wege! m) Wie verhält sich ein Kondensator im Gleichstromkreis? n) Wie verhalten sich Strom- und Spannung bei einem Kondensator im Wechselstromkreis? o) Wie wirkt sich die Frequenz des Wechselstromes auf den Kondensator aus? p) Wie groß ist der kapazitive Widerstand eines Kondensators von  $12 \mu F$  bei einer Frequenz von 50 Hz? q) Ein Kondensator soll bei einer Frequenz von 2 kHz einen kapazitiven Widerstand von rd. 250 Ohm haben. Wie groß muß seine Kapazität sein? r) In welchem Verhältnis stehen Schein- und kapazitiver Widerstand beim Kondensator? s) Ist die Phasenverschiebung bei einer Spule die gleiche wie bei einem Kondensator? Erkläre die Zusammenhänge!

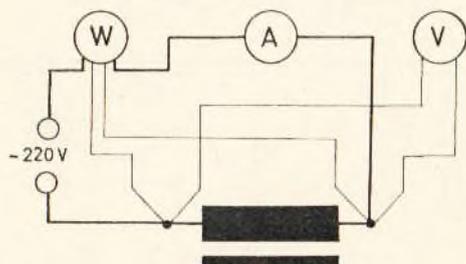
#### IV. Die Wechselstromleistung

Nach Abschnitt B III 1 ist der Ohmsche Widerstand im Gleich- und Wechselstromkreis gleich groß. Damit muß auch die Leistung beim Verbrauch am Ohmschen Widerstand bei beiden Stromarten gleich sein. Sie errechnet sich, wie wir bereits aus der Gleichstromlehre wissen, zu

$$P = U \cdot I$$

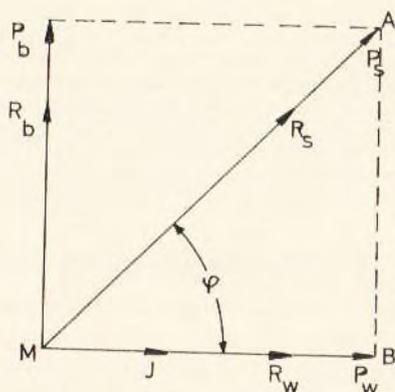
Diese Formel gilt auch für Wechselstrom, wenn für  $U$  und  $I$  die Effektivwerte eingesetzt werden. Wie sieht es nun mit der Leistung bei einer Spule aus, die ja neben dem Ohmschen auch noch einen induktiven Widerstand hat? Wir bedienen uns bei der Untersuchung des Versuchs nach dem Schema der Abb. 72. Wir schließen eine Spule mit 600 Windungen an 220 V Wechselstrom an und lesen die Werte an den Meßinstrumenten ab,

### Messen der Wechselstromleistung



(Abb. 72)

nämlich für  $U = 245$  V, für  $I = 6,4$  A und am Wattmeter 150 W. Wenn wir die Leistungen aus Strom und Spannung errechnen, so erhalten wir eine vom Wert des Wattmeters stark abweichende scheinbare Leistung von 1568 VA. Diese Leistung wird Scheinleistung genannt und in Volt mal Ampere (VA) ausgedrückt. 1000 VA sind gleich 1 kVA (Kilovolt-ampere). Die am Wattmeter gemessene wirkliche Leistung, die Wirklei-



(Abb. 73)

stung ist die am Wirkwiderstand verbrauchte Leistung, während die Scheinleistung am gesamten Scheinwiderstand (siehe auch Abb. 67) auftritt. Anhand des Zeigerdiagramms nach Abb. 67 können wir die Verhältnisse klar übersehen. Zur besseren Übersicht sind in Abb. 73 die Widerstands- und die Leistungszeiger in einundasselbe Diagramm aufgenommen worden. Der Wirkwiderstand  $R_w$  liegt in Phase mit dem Strom  $I$ . Den induktiven und den kapazitiven Widerstand wollen wir in Zukunft mit  $R_b$  (Blindwiderstand) bezeichnen.  $R_b$  hat immer eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  gegen den Strom, entweder vor- oder nachteilend, je nachdem, ob es sich um einen induktiven oder kapazitiven Blindwiderstand handelt. Der Scheinwiderstand  $R_s$  ergibt sich nach der Konstruktion des Parallelogramms aus der Diagonale  $M - A$ .

An den Widerständen entstehen die Leistungen, die Wirkleistung  $P_w$  an  $R_w$ , die Blindleistung  $P_b$  an  $R_b$ , und die Scheinleistung  $P_s$  an  $R_s$ . Zwischen  $P_w$  und  $P_s$  liegt der Phasenwinkel  $\varphi$ . Bei rein Ohmschem Widerstand ist  $P_s = P_w$  und der Phasenwinkel  $\varphi = 0$ .

Bei reinem Blindwiderstand ist  $P_b = P_s$  und  $\varphi = 90^\circ$ .

Bei der Spule wird bei reinem induktiven Widerstand die vom Netz aufgenommene Leistung zum Aufbau des Kraftfeldes verwendet und beim Abbau des Feldes wieder an das Netz zurückgegeben. Die Leistung wird also nicht verbraucht, das Wattmeter zeigt sie auch nicht an, man nennt sie die Blindleistung.

Der von der Blindleistung verursachte Blindstrom belastet die Leitungen, indem er sie erwärmt und außerdem einen zusätzlichen Spannungsabfall hervorruft. Deshalb soll zur Vermeidung von Verlusten der Phasenwinkel zwischen  $P_s$  und  $P_w$  möglichst klein sein.

Es ist

$$\cos \varphi = \frac{P_w}{P_s}$$

Bei unserem Versuch ist  $\cos \varphi = \frac{P_w}{P_s} = \frac{150}{1568} = 0,096$

Der Winkel  $\varphi$  wäre also rd.  $84,5^\circ$  und damit wären die Verluste sehr groß.

Bei reinem Wirkwiderstand ist  $P_w = P_s$  und  $\cos \varphi = 1$ . Bei reinem Blindwiderstand wird  $P_w = 0$  und  $\cos \varphi$  wird ebenfalls Null.

Bei reinem Wirkwiderstand ist die Wirkleistung

$$P_w = U \cdot I$$

Zum Beweis rechnen wir:

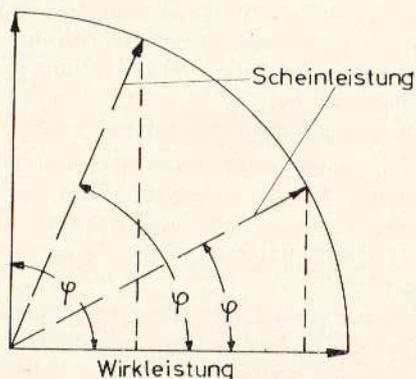
Bei reinem Blindwiderstand ist die Wirkleistung gleich Null, denn bei einem Winkel  $\varphi$  von  $90^\circ$  ist  $\cos \varphi = 0$ , und es ergibt sich

$$P_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot 0 = 0$$

Dagegen ist bei reinem Wirkwiderstand  $\cos \varphi = 1$ , weil der Phasenwinkel  $\varphi = 0$  ist, es ergibt sich

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot 1 = U \cdot I$$

Zwischen den Beträgen  $U \cdot I$  und Null liegen alle für die Wirkleistung möglichen Werte. Diese Werte kann man mit Hilfe des Zeigerdiagramms leicht ermitteln. Man läßt den Zeiger für die Scheinleistung von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  kreisen und fällt von den verschiedenen Punkten das Lot auf die Waagerechte, die den Zeiger der Wirkleistung darstellt. Mit zunehmendem Phasenwinkel  $\varphi$  wird die Wirkleistung immer kleiner, bis sie bei  $\varphi = 90^\circ$  gleich Null ist. Dementsprechend ist der  $\cos \varphi = 0$ .



(Abb. 74)

Der  $\cos \varphi$  beeinflusst also die Größe der Wirkleistung. Man nennt ihn deshalb den Leistungsfaktor.

Die Formel zur Errechnung der Wirkleistung im Wechselstromkreis lautet:

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

wobei  $U$  in Volt und  $I$  in Ampere einzusetzen sind.  $P$  ergibt sich dann in Watt.

Die Scheinleistung errechnet sich in VA zu

$$P_s = U \cdot I$$

Die Blindleistung kann man nach dem Pythagoras aus dem Dreieck M - A - B der Abb. 73 errechnen zu:

$$P_b = \sqrt{P_s^2 - P_w^2}$$

Die Blindleistung kann man auch, da M - A - B ein rechtwinkliges Dreieck ist, aus dem Seitenverhältnis der dem Winkel  $\varphi$  gegenüberliegenden zur längsten Seite errechnen. Dieses Verhältnis ist der Sinus des Winkels  $\varphi$  (siehe auch Band B 1). In unserem Falle ist  $P_b$  die dem Winkel gegenüberliegende Seite und  $P_s$  die längste Seite. Es ist also

$$\sin \varphi = \frac{P_b}{P_s}$$

Daraus ergibt sich nach Umstellung  $P_b = P_s \cdot \sin \varphi$  und da  $P_s = U \cdot I$  ist, wird

$$P_b = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Die Blindleistung wird in Voltampere-Reaktanz (VAr) gemessen. Reaktanz heißt Blindwiderstand.

Wenn man die Leistungen durch die Spannung teilt, erhält man die Stromanteile für den Wirk-, Blind- und Scheinstrom:

Für den Wirkstrom ergibt sich aus  $P_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

$$I_w = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U} = I \cdot \cos \varphi$$

Für den Scheinstrom ergibt sich aus  $P_s = U \cdot I$

$$I_s = \frac{U \cdot I}{U} = I$$

Für den Blindstrom ergibt sich aus  $P_b = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

$$I_b = \frac{U \cdot I \cdot \sin \varphi}{U} = I \cdot \sin \varphi$$

**1. Beispiel:**

Eine Spule eines Elektromagneten liegt an einer Wechselspannung von 220 V und wird von einem Strom von 1,2 A durchflossen. Wie groß ist die Wirkleistung, wenn der Leistungsfaktor 0,4 ist.

**Gegeben:**  $U = 220 \text{ V}$      $I = 1,2 \text{ A}$      $\cos \varphi = 0,4$

**Gesucht:**  $P_w$

**Lösung:**  $P_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \cdot 1,2 \cdot 0,4 = 106 \text{ W}$

**2. Beispiel:**

Eine Kraftanlage mit dem Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,85$  nimmt bei einer Betriebsspannung von 220 Volt eine Stromstärke von 460 Ampere auf. Wie groß ist die Blindleistung der Anlage?

**Gegeben:**  $U = 220 \text{ V}$      $I = 460 \text{ A}$      $\cos \varphi = 0,85$

**Gesucht:**  $P_b$

**Lösung:**  $P_b = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

Mit Hilfe einer Tafel für Winkelfunktionen suchen wir den Winkel zu  $\cos \varphi = 0,85$ , wir erhalten den Winkel  $\varphi = 31^\circ 50'$ ; dieser Winkel hat einen  $\sin = 0,5275$

$$P_b = 220 \cdot 460 \cdot 0,5275 = 53400 \text{ VAR}$$

**3. Beispiel:**

Welche Scheinleistung muß ein Generator wenigstens liefern können, wenn er einen Wirkleistungsbedarf von 30 kW und einen Blindleistungsanteil von 18 VAR decken soll? Wie groß ist der Leistungsfaktor?

**Gegeben:**  $P_w = 30 \text{ kW}$      $P_b = 18 \text{ VAR}$

**Gesucht:**  $P_s = \cos \varphi$

**Lösung:**  $P_b = P_s^2 - P_w^2$ ;     $P_s = \sqrt{P_w^2 + P_b^2}$

$$P_s = \sqrt{30^2 + 18^2} = \sqrt{1224} = 35 \text{ kVA}$$

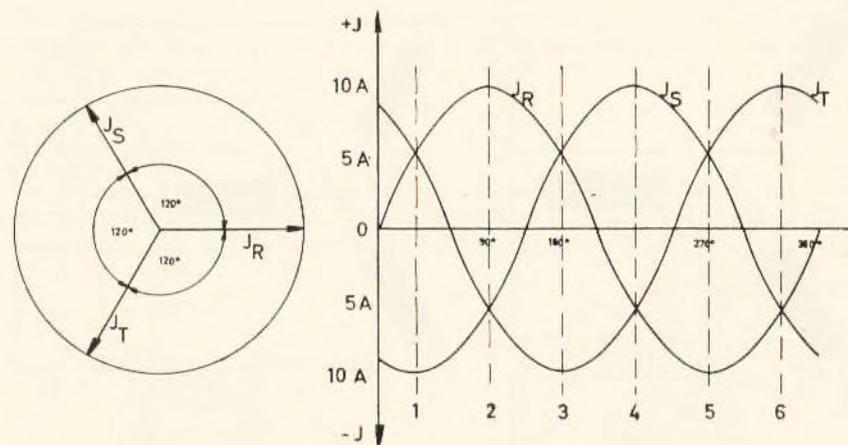
$$\cos \varphi = \frac{P_w}{P_s} = \frac{30 \text{ kW}}{35 \text{ kVA}} = 0,86$$

**1. Übungsaufgaben**

a) Ein Wechselstrommotor für 220 Volt nimmt 5,6 Ampere Strom auf. Die aufgenommene Wirkleistung hat einen Wert von 900 Watt. Wie groß ist der Leistungsfaktor? b) Auf dem Leistungsschild eines elektrischen Gerätes ist die Angabe der Spannung nicht mehr zu erkennen. Die Wirkleistung ist mit 1,2 kW, die Stromstärke mit 6,5 A und der Leistungsfaktor mit 0,84 angegeben. Welche Spannung ist für das Gerät vorgesehen? c) Eine Drosselspule nimmt bei einer effektiven Spannung von 50 V eine Wirkleistung von 0,2 W auf. Der Leistungsfaktor ist gleich 0,866. Wie groß ist die Stromstärke und welche Phasenverschiebung herrscht zwischen Strom und Spannung? d) Wie groß ist die Blindleistung einer Spule, bei der die Stromstärke von 180 mA der Spannung von 60 V um den Phasenwinkel  $\varphi$  von  $50^\circ$  nachteilig? e) Wie groß ist die Gesamtstromstärke, die von dem Verbraucher aufgenommen wird, dessen Blindstrom 0,7 A und dessen Leistungsfaktor 0,86 beträgt? f) Der Leistungsfaktor einer Anlage mit der Wirkleistung 40 kW wird von 0,78 auf 0,98 verbessert. Wie ändert sich dabei die Scheinleistung? g) Die Wirkleistung eines Verbrauchers beträgt 1,6 kW, seine Scheinleistung ist 1,75 kVA. Wie groß ist sein Leistungsfaktor?

**V. Der Mehrphasenwechselstrom****1. Der verkettete Wechselstrom**

Werden zur Erzeugung eines Wechselstromes in einem Wechselstromgenerator nicht nur eine, sondern drei Spulen angebracht, die im Winkel von  $120^\circ$  versetzt angeordnet sind (Abb. 75), so erhält man in jeder der



(Abb. 75)

drei Spulen einen Wechselstrom (Abb. 75, links). An jeder Spule entsteht eine Wechselspannung. Die Anfänge und die Enden der Spulen werden folgendermaßen benannt:

Spule I	Anfang U	Ende X
Spule II	Anfang V	Ende Y
Spule III	Anfang W	Ende Z

Die drei Wechselströme könnte man nach Art der Abb. 76 zum Verbraucher leiten. Diese Art ist jedoch noch kein Vorteil gegenüber dem einfachen Wechselstrom.

Aus der Abb. 75 können wir erkennen, daß die drei erzeugten Wechselströme nicht in Phase liegen, sondern daß sie in ihrer Phase um genau  $120^\circ$  verschoben sind. Zuerst wird in der Spule U - X der Höchstwert von Strom und Spannung erzeugt, nach einer Drittel-Drehung ( $120^\circ$ ) in der Spule V - Y und nach weiteren  $120^\circ$  Umdrehung des Polrades in der Spule W - Z.

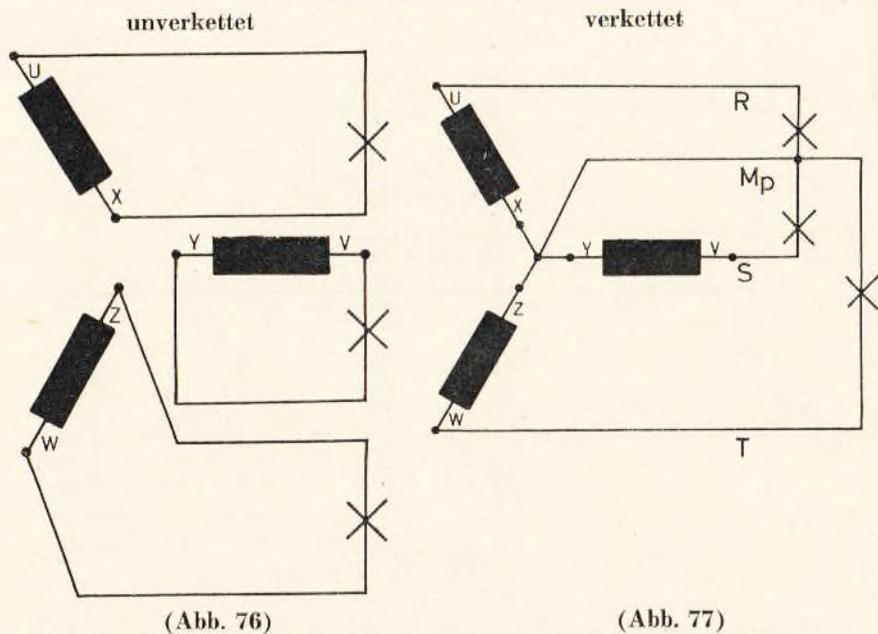
Die in den Spulen erzeugten Ströme werden folgendermaßen benannt:

Spule I (U - X) mit  $I_R$

Spule II (V - Y) mit  $I_S$

Spule III (W - Z) mit  $I_T$

### 3-Phasenwechselstrom



(Abb. 76)

(Abb. 77)

Wenn wir den Stromhöchstwert, wie in Abb. 75 aufgetragen, mit 10 Ampere annehmen, ergibt sich für die Punkte 1 bis 6 der Abb. 75 jeweils folgender **Summenstrom**:

Pkt 1:  $I_R = + 5 \text{ A}$ ,  $I_T = + 5 \text{ A}$ ,  $I_S = - 10 \text{ A}$ , Summe = 0 A

Pkt 2:  $I_R = + 10 \text{ A}$ ,  $I_S = - 5 \text{ A}$ ,  $I_T = - 5 \text{ A}$ , Summe = 0 A

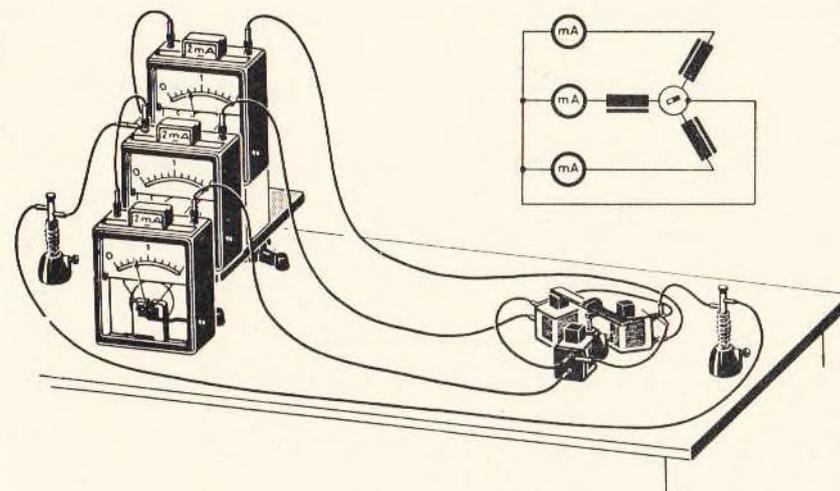
Für die Punkte 3 bis 6 ergibt die Summe aller drei Wechselstromwerte ebenfalls stets den Gesamtstrom  $I = 0$ . Demnach könnte man also die drei Rückleitungen zum Verbraucher in der Abb. 76 zusammenlegen. In dieser Leitung würde kein Strom fließen, vorausgesetzt, daß die Stromwerte in den drei Spulenkreisen gleich groß sind. Man könnte noch einen Schritt weiter gehen und den einzelnen Rückleiter auch noch fortlassen und stattdessen die Spulenenden X - Y - Z einfach miteinander verbinden.

Im Betrieb sind die Stromwerte der drei Spulenkreise jedoch nie ganz genau gleich. Deshalb führt man einen Rückleiter vom Mittelpunkt der Spulen aus mit, der den Ausgleichstrom aufnimmt. Diesen vom Mittelpunkt der drei zusammengeschalteten Spulen abgehenden Leiter nennt man den **Mittelpunktleiter (Mp)**. Die drei **Außenleiter** werden mit den Buchstaben R - S - T bezeichnet (Abb. 77). Sie sind sinngemäß den drei Spulenanschlüssen U - V - W zugeordnet.

Weil jeder Außenleiter eine bestimmte Stromphase führt, spricht man auch von den Phasen R - S - T. Der durch die Verkettung der drei Spulenenden X - Y - Z entstandene Strom heißt **verketteter** oder auch **dreiphasiger Wechselstrom**. Man nennt ihn auch **Drehstrom**, weil er ein Drehfeld erzeugt, wie wir noch sehen werden.

#### a) Die Sternschaltung

In dem Versuch nach Abb. 78 sind die drei Außenleiter an drei Spulen mit je 1200 Windungen angeschlossen. Die Spulenenden sind miteinander verbunden, an die Verbindungsstelle ist der Mittelpunktleiter angeschlossen.



(Abb. 78)

tet. Weil die drei Spulen in Form eines Sterns geschaltet sind, nennt man diese Schaltung die **Sternschaltung**. Den Anschaltspunkt für den Mittel-

punktsleiter bezeichnet man als **Sternpunkt**. Bei der Untersuchung dieser Schaltung stellen wir fest:

1. Bei gleicher Belastung der drei Außenleiter ist der Mittelpunktsleiter stromlos.
2. Bei gleicher Belastung kann der Mittelpunktsleiter fortgelassen werden.
3. Bei ungleichmäßiger Belastung (Spulen im Versuch mit je 300, 600, 1200 Windungen) der drei Außenleiter nimmt der Mittelpunktsleiter den Ausgleichsstrom auf.
4. Die Ströme in den Außenleitern sind gleich groß.

Im Außenleiter fließt der Strom  $I$ . Die Ströme in den Spulenleitungen zum Sternpunkt hin sind von gleicher Größe, man nennt sie die Phasenströme und bezeichnet sie mit  $I_{ph}$ . Es ist also

$$I = I_{ph}$$

Die Spannung zwischen den Außenleitern (z. B. zwischen R und S) ist  $U = 380$  Volt.

Die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt ist  $U_{ph} = 220$  Volt.

Wenn man die Außenspannung durch die Phasenspannung teilt, so ergibt sich:

$$\frac{U}{U_{ph}} = \frac{380}{220} = 1,73 \text{ das ist } \sqrt{3}$$

Die Außenspannung ist also 1,73mal größer als die Phasenspannung:

$$U = 1,73 \cdot U_{ph}$$

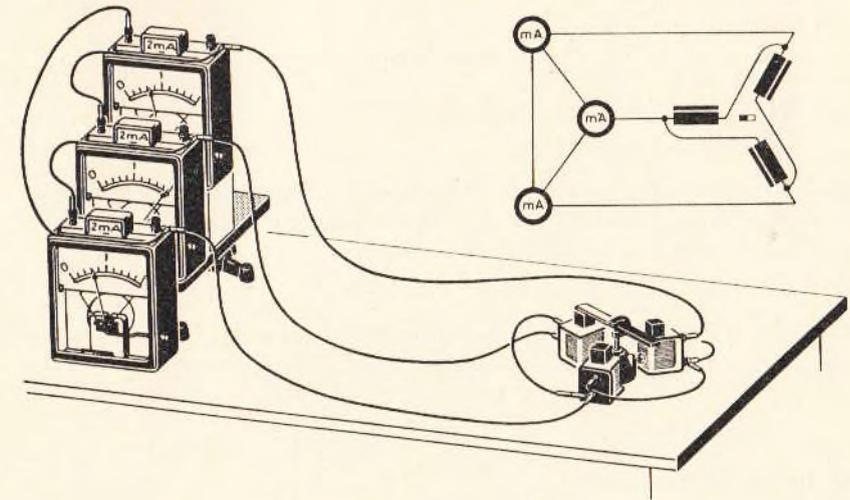
Bei einer Sternschaltung können immer zwei Spannungen abgenommen werden:

1. Die Außenspannung (verkettete Sp.)  $U = 1,73 \cdot U_{ph}$
2. Die Phasenspannung  $U_{ph} = \frac{U}{1,73}$

#### b) Die Dreieckschaltung

Bei dem Versuch nach Abb. 79 werden die drei Spulen so an die drei Außenleiter R, S, T angeschlossen, daß je ein Spulenanschluss einmal mit einem Außenleiter und zum anderen mit dem Ende der vorhergehenden

Spule verbunden ist. Die drei Spulen sind hier in Form eines Dreiecks geschaltet, man nennt sie deshalb auch **Dreiecksschaltung**. Bei dieser Schaltung wird kein Mittelpunktsleiter verwendet, sie gilt also nur für gleich-



(Abb. 79)

mäßige Belastung der drei Außenleiter. Bei der Untersuchung dieser Schaltung stellen wir fest:

#### ■ 1. Die Ströme in den drei Außenleitern sind gleich groß.

Im Außenleiter messen wir einen Strom von  $I = 0,92$  A; in den Phasen einen solchen von  $I_{ph} = 0,53$  A.

Teilen wir nun den Außenstrom durch den Phasenstrom, so ist:

$$\frac{I}{I_{ph}} = \frac{0,92}{0,53} = 1,73, \text{ das ist } \sqrt{3}$$

Der Außenstrom ist also 1,73mal größer als der Phasenstrom:

$$I = 1,73 \cdot I_{ph}$$

#### ■ 2. Bei der Dreiecksschaltung ist die Außenspannung gleich der Phasenspannung.

Wir messen zwischen Außenleitern eine Spannung  $U = 380 \text{ V}$ , und eine Phasenspannung  $U_{\text{ph}}$  von ebenfalls  $380 \text{ V}$ :

$$U = U_{\text{ph}}$$

## 2. Die Drehstromleistung

Die Wechselstromleistung errechnet sich zu

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

Beim Drehstrom wird in jeder Phase eine Leistung erzeugt und verbraucht. Es sind deshalb auch 3 Wechselstromleistungen vorhanden, nämlich die Summe der drei Phasenleistungen:

$$P = 3 \cdot P_{\text{ph}} = 3 \cdot U_{\text{ph}} \cdot I_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi$$

Ersetzen wir die Phasenwerte durch die Netzspannung  $U$  und den Netzstrom  $I$ , so gilt für die **Sternschaltung**:

$$I = I_{\text{ph}}; U_{\text{ph}} = \frac{U}{1,73}$$

in die Formel eingesetzt:

$$P = 3 \cdot \frac{U}{1,73} \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ und da } 1,73 \cdot 1,73 = \text{rd. } 3 \text{ ist, ergibt sich } P = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

**Dreiecksschaltung:**

$$U = U_{\text{ph}}; I_{\text{ph}} = \frac{I}{1,73}$$

in die Formel eingesetzt:

$$P = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{1,73} \cdot \cos \varphi \text{ oder wie oben gekürzt ergibt auch hier } P = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Wir erkennen also:

**Die Drehstromleistung eines in allen Phasen gleichmäßig belasteten Drehstromerzeugers gilt sowohl für die Stern- als auch für die Dreiecksschaltung**

$$P = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

**Beispiel:**

Ein Drehstrommotor für eine Spannung von  $380 \text{ Volt}$  nimmt bei einem  $\cos \varphi$   $1,2$  Ampere Strom auf. Wie groß ist die aufgenommene Leistung?

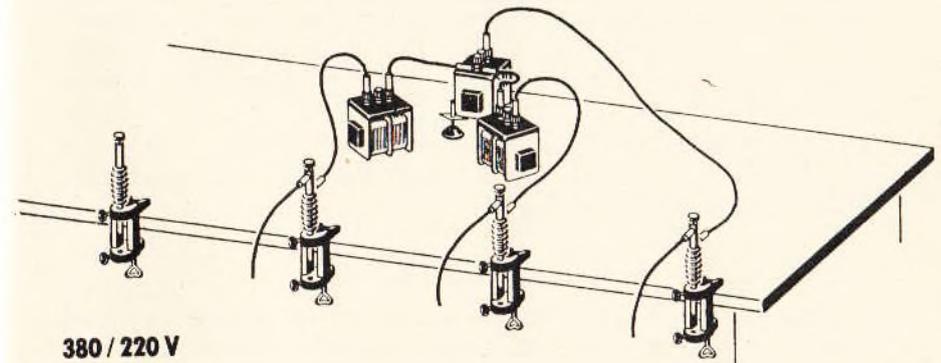
$$\text{Gegeben: } U = 380 \text{ V} \quad I = 1,2 \text{ A} \quad \cos \varphi = 0,82$$

$$\text{Gesucht: } P$$

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } P &= 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \\ &= 1,73 \cdot 380 \cdot 1,2 \cdot 0,82 = \text{rd. } 647 \text{ W} \end{aligned}$$

## 3. Das Drehfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 80 werden drei Spulen mit je  $2 \times 1800$  Windungen und mit Eisenkern in Sternschaltung an das Drehstromnetz angeschlossen. In die Mitte der Spulen stellen wir eine drehbar gelagerte Ma-



**380 / 220 V**

(Abb. 80)

gnetnadel auf. Nach Einschaltung des Stromes dreht sich die Magnetnadel mit hoher Geschwindigkeit rechts herum. Wenn die Nadel nicht anläuft, muß man sie mit einem Ruck rechts herum anwerfen, sie läuft dann mit hoher Drehzahl weiter.

Die Drehung der Magnetnadel kommt dadurch zustande, daß der Nordpol der Nadel von einem Südpol angezogen wird, der in den drei Spulen vom Drehstrom erzeugt (induziert) wird. Die gleiche Wirkung können wir auch bei der Dreiecksschaltung erreichen.

Die Magnetnadel und damit das in den Spulen aufgebaute Feld dreht sich im Uhrzeigersinn herum. Bei einer Frequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$  dreht das Feld sich 50mal in der Sekunde und in einer Minute  $50 \cdot 60 = 3000$ mal.

Vertauschen wir die Außenleiter R und S an den Spulen, so drehen sich die Magnetnadel und das Feld links herum.

Wir fassen zusammen:

**Der Drehstrom erzeugt in drei Spulen, die im Winkel von  $120^\circ$  angeordnet und die in Stern- oder Dreiecksschaltung verbunden sind, ein Drehfeld. Die Drehrichtung kann durch Vertauschen zweier Außenleiter umgekehrt werden.**

#### 4. Der Synchronmotor

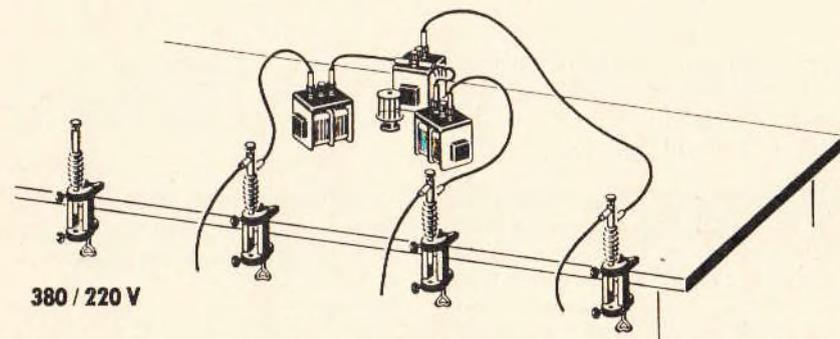
Bei dem Versuch nach Abb. 80 drehte sich die Magnetnadel mit der gleichen Umdrehungszahl wie das Drehfeld, sie lief gleichzeitig oder auch **synchron**. Nach diesem System ist der Synchronmotor aufgebaut. Dabei werden statt der Dauermagnete starke Elektromagnete verwendet.

Synchronmotore haben den **Nachteil**, daß sie nur mit Hilfe einer Anwurfvorrichtung in Gang gesetzt werden können. Bei Überlastung geraten sie in einen unregelmäßigen Lauf und bleiben stehen. Bei großen Motoren ist eine Gleichstromquelle erforderlich, die die Wicklungen der Elektromagneten speisen muß.

Der große **Vorteil** eines Synchronmotors ist die Tatsache, daß er mit gleichbleibender, konstanter, Drehzahl läuft. Dieses Vorteils bedient man sich bei elektrischen Uhrenanlagen.

#### 5. Der Asynchronmotor

An Stelle der Magnetnadel im vorhergehenden Versuch stellen wir jetzt nach Abb. 81 einen runden Käfig aus Kupferstäben, der auf einer Nadel gelagert ist, in die Mitte der drei Spulen. Sobald wir den Strom einschalten,



(Abb. 81)

läuft der Käfig rechts herum. Die Drehrichtungsänderung erreicht man auch hier durch das Vertauschen zweier Phasenleitungen.

Wir haben hier das Prinzip des Asynchronmotors; **asynchron** deshalb, weil der Käfigläufer immer um einen geringen Betrag hinter der synchronen Drehzahl zurückbleibt. Der Motor läuft also zeitungleich.

Der **Vorteil** des Asynchronmotors ist sein Anlaufen ohne Hilfsmittel und die Tatsache, daß er sich innerhalb des Bereichs seiner Belastbarkeit den vorhandenen Belastungen selbsttätig anpaßt.

#### 6. Übungsaufgaben

a) Wie werden die drei Spulen des Drehstromgenerators oder -motors an ihren Anfängen und Enden bezeichnet? b) Skizziere die Anordnung der drei Spulen eines Drehstrommotors bei Stern- und bei Dreiecksschaltung! c) Wie verhalten sich Außenstrom zu Phasenstrom und Außenspannung zu Phasenspannung bei der Stern- und bei der Dreiecksschaltung? d) Ein Drehstromgenerator mit einer Spannung von 380 Volt gibt bei einem Leistungsfaktor von 0,86 eine Scheinleistung von 60 kVA ab. Wie groß sind die abgegebene Wirkleistung und der Strom in den Außenleitern? e) Was versteht man unter den Begriffen „Drehfeld“, „Synchronmotor“ und „Asynchronmotor“?

## C. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis

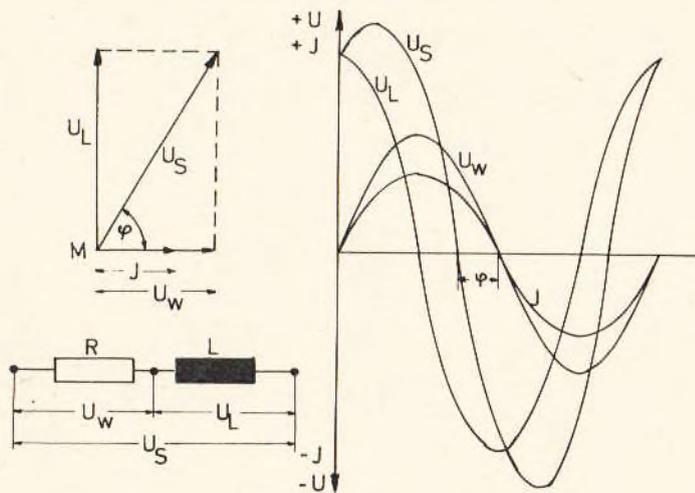
Im Kapitel B Abschnitt III haben wir die Widerstände im Wechselstromkreis einzeln betrachtet. In der Praxis haben wir es jedoch mit verschiedenen Widerständen in ein und demselben Wechselstromkreis zu tun, es kommen Reihen- und Parallelschaltungen von Ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerständen vor. So haben wir bei der Spule bereits zwei gleichzeitig wirkende Widerstände kennengelernt, nämlich den Wirkwiderstand und den induktiven Widerstand.

### I. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen

#### 1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand

Die Abb. 82 ähnelt stark der uns bekannten Abb. 66. Hier sind nur die Größen im Zeigerdiagramm etwas erweitert. Wir erinnern uns auch, daß bei einem rein Ohmschen Widerstand Strom und Spannung in Phase

Reihenschaltung von R und L



(Abb. 82)

sind, während bei einem rein induktiven Widerstand der Strom der Spannung um  $90^\circ$  nacheilt. Wir haben im Abschnitt B III 2 f die Größen für Strom und Spannung zeichnerisch ermittelt, nunmehr wollen wir es mit Hilfe des Pythagoräischen Lehrsatzes wiederholen. Aus dem Zeigerdiagramm der Abb. 82 entnehmen wir:

$$U_S^2 = U_W^2 + U_L^2 \text{ oder umgestellt}$$

$$U_S = \sqrt{U_W^2 + U_L^2}$$

Vom Ohmschen Gesetz her wissen wir, daß  $U = I \cdot R$  ist. Damit wird

$$U_S = \sqrt{(I \cdot R_W)^2 + (I \cdot R_L)^2}$$

Wir haben bereits gelernt, daß  $R_L = 2 \pi f \cdot L$  und daß  $2 \pi f = \omega$  ist. Wir schreiben deshalb nach Umstellung

$$U_S = I \cdot \sqrt{R_W^2 + (\omega L)^2}$$

Das Verhältnis  $\frac{U_S}{I}$  ist dann der gesamte Widerstand der Reihenschaltung, den wir bereits als Scheinwiderstand  $R_S$  kennen; man bezeichnet ihn jedoch mit dem Buchstaben  $Z$ , wie wir es nunmehr auch tun wollen. Es ist also:

$$Z = \frac{U_S}{I} = \sqrt{R_W^2 + (\omega L)^2}$$

Wenn wir die Phasenlage zwischen der Spannung  $U_S$  und dem Strom  $I$  errechnen wollen, müssen wir uns des Tangens des Winkels  $\varphi$  bedienen. Unter dem Tangens eines Winkels versteht man das Verhältnis der Gegenkathete zur Ankathete (im übrigen siehe über Winkelfunktionen im Band B 1). Aus unserem Zeigerdiagramm können wir also ableiten:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_W} = \frac{I \cdot \omega L}{I \cdot R_W} = \frac{\omega L}{R_W}$$

Wir fassen unsere Erkenntnisse nochmals zusammen:

Bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und induktivem Widerstand eilt der Strom der Spannung nach. Dabei ergibt sich der Phasenwinkel aus dem Verhältnis des induktiven zum Ohmschen Widerstand.

**Beispiel:**

Eine Spule hat einen Wirkwiderstand von 50 Ohm und eine Induktivität von 4 mH. Wie groß sind der Scheinwiderstand bei einer Frequenz von 800 Hz und der Phasenwinkel?

**Gegeben:**  $R = 50 \Omega$        $L = 0,004 \text{ H}$        $f = 800 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $Z$        $\varphi$

**Lösung:**  $R_L = \omega L = 2\pi f \cdot L$   
 $= 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 0,004 = \text{rd. } 20 \Omega$

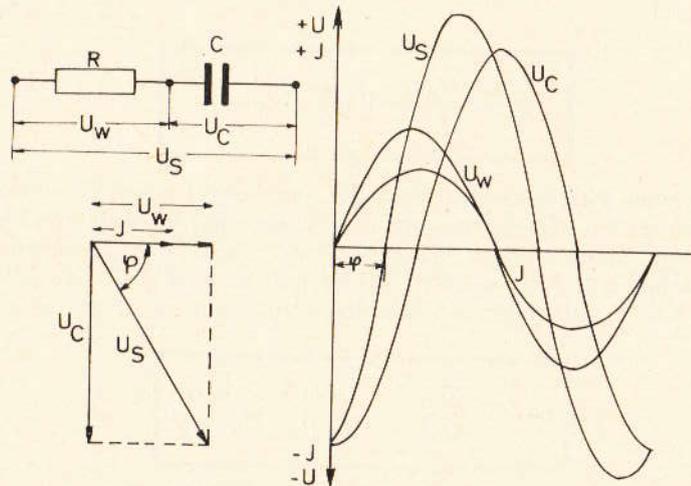
$$Z = \sqrt{R_W^2 + R_L^2} = \sqrt{50^2 + 20^2} = 53,85 \Omega$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L}{R_W} = \frac{20}{50} = 0,4$$

$$\varphi = \text{rd. } 22^\circ$$

**2. Wirkwiderstand und kapazitiver Widerstand**

Wir haben bereits den Kondensator im Wechselstromkreis kennengelernt und dabei festgestellt, daß der Strom der Spannung um  $90^\circ$  voraus-eilt. Wenn wir jetzt einen Ohmschen Widerstand mit einem Kondensator

**Reihenschaltung von R und C**

(Abb. 83)

in Reihe schalten, so zeigt uns das Zeigerdiagramm der Abb. 83, daß der Strom und der Spannungsabfall über dem Wirkwiderstand ( $U_W = I \cdot R_W$ )

in Phase sind, während die Spannung am Kondensator dem Strom um  $90^\circ$  nacheilt. Es ist

$$U_C = \frac{I}{\omega C}$$

Aus dem Zeigerdiagramm können wir weiter entnehmen, daß  $U_S^2 = U_W^2 + U_C^2$  oder  $U_S = \sqrt{U_W^2 + U_C^2}$  ist.

Nach dem Ohmschen Gesetz wird

$$U_S = \sqrt{(I \cdot R_W)^2 + (I \cdot \frac{1}{\omega C})^2} = I \cdot \sqrt{R_W^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}$$

Auch hier erhalten wir aus dem Verhältnis  $\frac{U_S}{I}$  den Scheinwiderstand  $Z$ :

$$Z = \sqrt{R_W^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}$$

Der Phasenwinkel errechnet sich zu

$$\text{tg } \varphi = \frac{U_C}{U_W} = \frac{\frac{I}{\omega C}}{I \cdot R_W} = \frac{1}{R_W \cdot \omega C}$$

Wir fassen unsere Erkenntnisse zusammen:

**Bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und kapazitivem Widerstand eilt der Strom der Spannung voraus. Dabei ergibt sich der Phasenwinkel aus dem Verhältnis des kapazitiven zum Ohmschen Widerstand.**

**Beispiel:**

Ein Kondensator von  $C = 4 \mu\text{F}$  ist mit einem Ohmschen Widerstand von 60 Ohm in Reihe geschaltet, die Frequenz beträgt 800 Hz. Wie groß sind der Scheinwiderstand und der Phasenwinkel?

**Gegeben:**  $C = 0,000004 \text{ F}$        $R = 60 \Omega$        $f = 800 \text{ Hz}$

**Gesucht:**  $Z$

**Lösung:**  $R_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 800 \cdot 0,000004} = 50 \Omega$

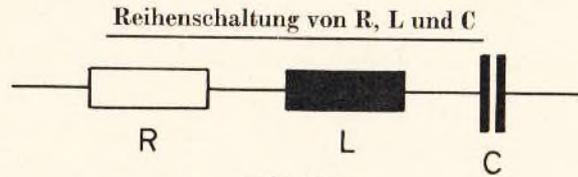
$$Z = \sqrt{R_W^2 + R_C^2} = \sqrt{60^2 + 50^2} = 78,1 \Omega$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{R_C}{R_W} = \frac{50}{60} = 0,803$$

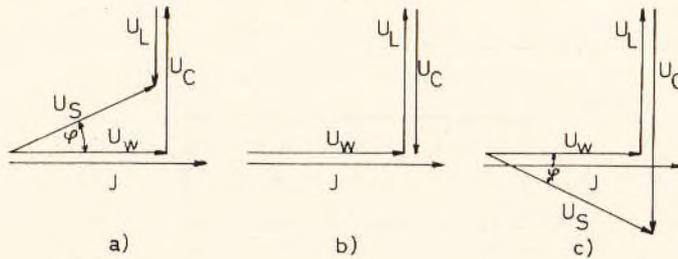
$$\varphi = \text{rd. } 39^\circ$$

### 3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand

Die Widerstände werden in der in Abb. 84 gezeigten Weise hintereinander geschaltet.



(Abb. 84)



$$\omega L > \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega L < \frac{1}{\omega C}$$

(Abb. 85)

Aus dem Zeigerdiagramm nach Abb. 85 können wir erkennen, daß der Phasenunterschied zwischen dem Spannungsabfall über dem induktiven Widerstand ( $U_L$ ) und dem Spannungsabfall über dem kapazitiven Widerstand ( $U_C$ )  $180^\circ$  beträgt.

Aus dem Zeigerdiagramm der Abb. 85 ersehen wir außerdem, daß die Werte für  $U_S$  abhängig sind von den Werten für  $U_L$  und  $U_C$ . **Der Zeiger für  $U_L$  wird stets nach oben und der Zeiger für  $U_C$  stets nach unten verlaufend angetragen**, d. h., daß der Wert von  $U_C$  von dem Wert für  $U_L$  abgezogen werden muß. Nach den bisherigen Betrachtungen und mit Hilfe der Zeigerdiagramme nach Abb. 85 können wir die Formel für den Scheinwiderstand ableiten:

$$\begin{aligned} U_S &= \sqrt{U_W^2 + (U_L^2 - U_C^2)} \\ &= \sqrt{(I \cdot R_W^2) + [(I \cdot \omega L)^2 - (I \cdot \frac{1}{\omega C})^2]} \\ &= I \cdot \sqrt{R_W^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \end{aligned}$$

Auch hier bildet das Verhältnis zwischen  $U_S$  und  $I$  den Scheinwiderstand und es ist:

$$Z = \frac{U_S}{I} = \sqrt{R_W^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Den Phasenwinkel erhält man aus folgender Berechnung:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I \cdot \omega L - I \cdot \frac{1}{\omega C}}{I \cdot R_W} = \frac{I \cdot (\omega L - \frac{1}{\omega C})}{I \cdot R_W}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_W}$$

Der Ausdruck  $(\omega L - \frac{1}{\omega C})$  stellt den gesamten in der Reihenschaltung vorhandenen Blindwiderstand dar.

Aus den Zeigerdiagrammen nach Abb. 85 erkennen wir:

**Bei einer Reihenschaltung von  $R$ ,  $L$  und  $C$  eilt der Strom der Spannung nach, wenn der induktive Widerstand größer als der kapazitive ist; der Phasenwinkel ist dann positiv (Abb. 85a).**

**Ist der kapazitive Widerstand größer als der induktive, so eilt der Strom der Spannung voraus; der Phasenwinkel ist negativ (Abb. 85c).**

**Bei positiven Blindwiderständen ergeben sich induktive, bei negativen Blindwiderständen kapazitive Scheinwiderstände.**

**Haben der induktive und der kapazitive Widerstand gleich große Werte, so ist nur der Ohmsche Widerstand wirksam; der Phasenwinkel ist gleich Null (Abb. 85b).**

Wir erhalten das **Ohmsche Gesetz für Wechselstrom**, wenn wir in dem uns bekannten Gesetz  $U = I \cdot R$  den Gleichstromwiderstand  $R$  durch den Scheinwiderstand  $Z$  ersetzen:

$$U = I \cdot Z$$

**Beispiel:**

Eine Reihenschaltung mit einem Wirkwiderstand von 50 Ohm, einer Induktivität von 200 mH und einer Kapazität von 100  $\mu$ F liegt an einer Spannung von 220 V bei

einer Frequenz von 50 Hz. Berechne den Scheinwiderstand, den Phasenwinkel, den Strom und die Spannungsabfälle über den Widerständen!

**Gegeben:**  $U = 220 \text{ V}; f = 50 \text{ Hz}; R_W = 50 \Omega; L = 0,2 \text{ H}; C = 0,0001 \text{ F}$

**Gesucht:**  $Z, \varphi, I, U_W, U_L, U_C$

**Lösung:**  $R_L = \omega L = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \Omega$

$$R_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0001} = \frac{1}{0,0314}$$

$$R_C = 31,8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R_W^2 + (R_L - R_C)^2} = \sqrt{50^2 + (62,8 - 31,8)^2}$$

$$Z = \sqrt{50^2 + 31^2} = \sqrt{3461} = \text{rd. } 58,9 \Omega$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_W} = \frac{62,8 - 31,8}{50} = 0,62$$

$$\varphi = \text{rd. } 31^\circ$$

der Phasenwinkel ist positiv, die Reihenschaltung hat somit induktiven Charakter.

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{58,9} = 3,74 \text{ A}$$

$$U_W = I \cdot R_W = 3,74 \cdot 50 = 187 \text{ V}$$

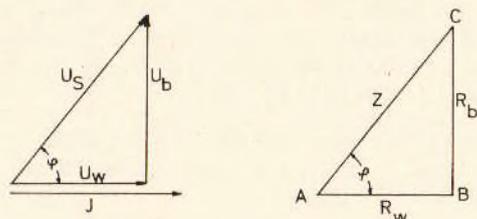
$$U_L = I \cdot R_L = 3,74 \cdot 62,8 = \text{rd. } 235 \text{ V}$$

$$U_C = I \cdot R_C = 3,74 \cdot 31,8 = \text{rd. } 119 \text{ V}$$

#### 4. Das Widerstandsdreieck

Im linken Teil der Abb. 86 ist ein Spannungsdreieck aufgezeichnet. Dabei ist der Strom  $I$  als der Bezugszeiger, auf den die anderen Zeiger bezogen sind, anzusehen. Die Wirkspannung ist mit dem Strom in Phase,

#### Spannungs- u. Widerstandsdreieck



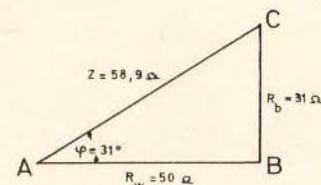
(Abb. 86)

wie wir es schon früher erkannt haben. Senkrecht zu  $U_W$  ist die Blindspannung aufgetragen, die hier von dem gesamten Blindwiderstand, sowohl von dem induktiven als auch von dem kapazitiven, abhängig ist.  $U$  bzw.  $U_S$  ergibt sich als Hypothense des rechtwinkligen Dreiecks.

Wenn wir jetzt die Beträge der Spannungen durch den Wert des Stromes teilen, so erhalten wir das Widerstandsdreieck (im rechten Teil der Abb. 86) mit den Seiten  $R_W, R_b$  und  $Z$ . Wir erkennen, daß der Phasenwinkel von der Größe des Stroms unabhängig ist. Mit Hilfe des Widerstandsdreiecks kann man den Scheinwiderstand  $Z$  und den Phasenwinkel  $\varphi$  zeichnerisch ermitteln (siehe hierzu Band B 1 Abschnitt A VI).

#### Beispiel:

Wir wollen uns der Werte aus dem Beispiel des vorhergehenden Abschnitts bedienen. Es waren  $R_W = 50 \Omega$  und  $R_b = 31 \Omega$  ( $R_L - R_C$ ). Wir tragen also auf der Waage rechten  $R_W = 50 \Omega = 5 \text{ cm}$  ab. Sodann errichten wir im Punkt B die Senkrechte und tragen  $R_b = 31 \Omega = 3,1 \text{ cm}$  ab. Die Verbindungslinie zwischen den Punkten A und C entspricht dem Wert für  $Z$ ; wir messen 5,89 cm, d. s. in unserem Maßstab 58,9  $\Omega$ . Mit einem Winkelmesser messen wir den Wert für den Phasenwinkel  $\varphi = 31^\circ$ . (Die Lösung ist in der Abb. 87 gezeichnet).

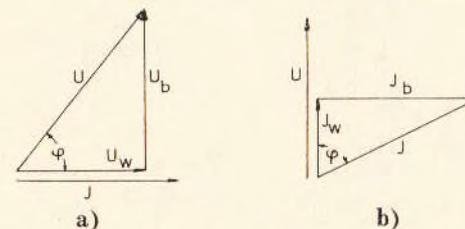


(Abb. 87)

#### 5. Spannungs- und Stromdreieck

Mit Hilfe des Spannungsdreieckes kann man die Spannung  $U$  in ihren Wirk- und Blindanteil zerlegen, das gleiche gilt für den Strom  $I$ . Dabei ist immer darauf zu achten, daß der Wirkanteil (Pfeil  $U_W$  bzw.  $I_W$ ) mit dem Bezugsstrahl in Phase ist.

#### Spannungs- u. Stromdreieck



(Abb. 88)

Aus dem Spannungsdreieck nach Abb. 88a können wir ableiten:

$$U_W = U \cdot \cos \varphi$$

$$U_b = U \cdot \sin \varphi$$

Die Zerlegung des Stromes erfolgt nach Abb. 88b:

$$I_W = I \cos \varphi$$

$$I_b = I \sin \varphi$$

## II. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen

Zur Berechnung der Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen muß man das Rechnen mit komplexen Zahlen beherrschen. Im Rahmen dieses Buches soll deshalb die Parallelschaltung nur behandelt werden, soweit sie für die Resonanz von Bedeutung ist. (Siehe deshalb unter C III 2 „Parallelresonanz“.)

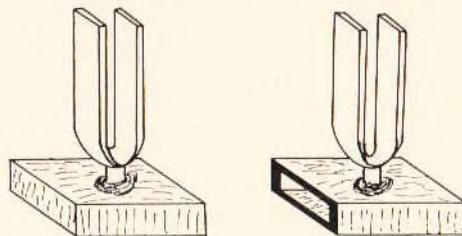
## III. Die Resonanz

Zum besseren Verständnis der hier zu behandelnden elektrischen Resonanz sei ein physikalischer Vorgang in unser Gedächtnis zurückgerufen:

Wir haben in der Schule gelernt, daß ein Körper, der Schwingungen einer bestimmten Schwingungszahl ausführen kann, durch einen mit derselben Schwingungszahl schwingenden Körper zum Mitschwingen veranlaßt wird. Dieser Vorgang heißt **Resonanz** (aus dem Lateinischen, resonare = Mittönen, Mitklingen, Mitschwingen).

Um die Erinnerung noch deutlicher zu machen, wollen wir uns einen Versuch vor Augen führen:

### Resonanz zweier Stimmgabeln

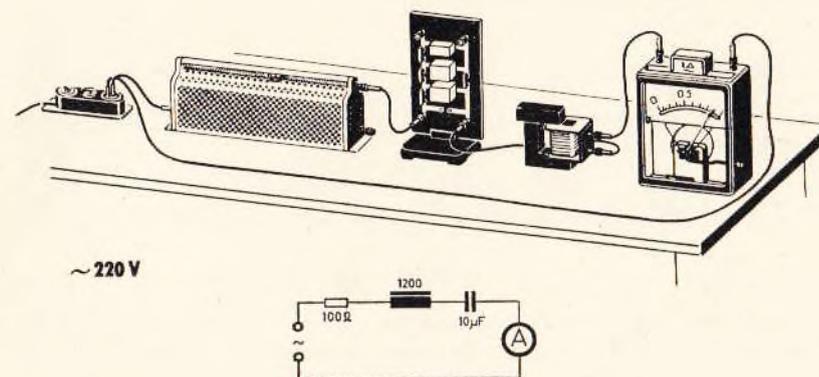


(Abb. 89)

Wir nehmen zwei Stimmgabeln mit dem Kammerton a und stellen sie in geringer Entfernung einander gegenüber (Abb. 89). Nachdem wir die erste Stimmgabel zum Erklingen gebracht haben, bringen wir sie durch Berühren mit der Hand wieder zum Verstummen. Trotzdem hören wir ein gleiches Tönen wie vorher. Es kommt von der zweiten Stimmgabel, die wir nicht angeschlagen hatten. Die zweite Stimmgabel ist, da sie die gleiche Eigenfrequenz hat wie die erste, von dieser zum Mitschwingen angeregt worden. Diesen Vorgang nennt man Resonanz.

## 1. Die Reihenresonanz

Zunächst wollen wir noch einen Versuch mit hintereinander geschalteten Wechselstromwiderständen nach Abb. 90 durchführen.



(Abb. 90)

Wir schalten zu Beginn einen Ohmschen Widerstand und einen Kondensator von  $10 \mu\text{F}$  in Reihe. Das Amperemeter zeigt einen Wert von etwa  $0,4 \text{ A}$  an.

Mit dem gleichen Widerstand schalten wir nun statt des Kondensators eine Spule mit U-Kern in Reihe. Das Amperemeter zeigt einen Strom von etwa  $0,5 \text{ A}$  an. Erhöhen wir die Induktivität der Spule, indem wir ein Joch über den U-Kern schieben, so sinkt der Strom auf einen Wert von etwa  $0,2 \text{ A}$  ab.

Jetzt wollen wir alle drei Widerstände (Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand) hintereinander schalten. Der Strom wird dadurch nicht etwa kleiner, sondern größer. Er steigt noch an, wenn das Joch

zurückgeschoben wird, erreicht einen Höchstwert und sinkt bei weiterem Zurückschieben des Joches wieder ab.

Aus dem Versuch erkennen wir:

**Bei der Reihenschaltung induktiver mit kapazitiven Widerständen ist der Gesamtwiderstand nicht wie bei Ohmschen Widerständen größer als einer der Teilwiderstände, sondern kleiner.**

**Der Gesamtwiderstand kann sehr klein werden. Es wirkt dann nur noch der Ohmsche Widerstand.**

Aus diesen Erkenntnissen können wir ableiten, daß bei ausschließlicher Wirksamkeit des Ohmschen Widerstandes  $\omega L$  gleich sein muß  $\frac{1}{\omega C}$ .

Unser Versuch bestätigt dies. Der Stromwert war am höchsten bei einer bestimmten Stellung des Joches, wodurch der induktive dem kapazitiven Blindwiderstand angeglichener wurde.

**Der Zustand, in dem  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  ist, heißt Resonanz; und da es sich hier um die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen handelt, sprechen wir von Reihenresonanz.**

Die Blindwiderstände  $\omega L$  und  $\frac{1}{\omega C}$  sind frequenzabhängig ( $\omega L = 2\pi f \cdot L$ ;  $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$ ). Damit ist auch der Resonanzfall frequenzabhängig. **Der Resonanzfall tritt also nur für einen bestimmten Wert der Frequenz ein, nämlich für die Resonanzfrequenz.** Für diese Resonanzfrequenz ist der Widerstand der Reihenschaltung am geringsten, er ist gleich dem Ohmschen Widerstand. Für jede andere Frequenz, gleichgültig ob höher oder tiefer, wird der Widerstand größer.

Aus der Resonanzbedingung  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  kann man die Resonanzfrequenz errechnen. Es ist nach Umstellung

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Setzen wir statt  $\omega$  den Begriff  $2\pi f$  ein, so wird

$$2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

und nach  $f$  aufgelöst, ergibt sich die Resonanzfrequenz zu:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (in Hz)}$$

In die Formel sind  $L$  in Henry und  $C$  in Farad einzusetzen. Die Formel wird nach dem englischen Physiker Thomson die **Thomson'sche Schwingungsformel** genannt.

An Hand eines Beispiels wollen wir die Blindspannungsabfälle untersuchen.

#### Beispiel:

Eine Reihenschaltung bestehend aus  $R_W = 22 \Omega$ ,  $L = 0,2 \text{ H}$  und  $C = 20 \mu\text{F}$  liegt an einer Wechselspannung  $U = 220 \text{ V}$  bei veränderlicher Frequenz. Errechne die Resonanzfrequenz, den Strom im Resonanzfall und die Spannungsabfälle an den Blindwiderständen!

**Gegeben:**  $U = 220 \text{ V}$ ;  $L = 0,2 \text{ H}$ ;  $C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

**Gesucht:**  $f_{\text{res}}$ ,  $I$ ,  $U_L$ ,  $U_C$

**Lösung:** Nach der Thomson'schen Formel ist

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}} \\ = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,000004}} = 79,6 \text{ Hz}$$

Im Resonanzfall ist  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  und damit

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

Für den Wert des Stromes ist also nur der Wirkwiderstand maßgebend:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{22} = 10 \text{ A}$$

Die Spannungsabfälle über den Blindwiderständen errechnen sich zu

$$U_L = I \cdot \omega L = 10 \cdot 2\pi \cdot 79,6 \cdot 0,2 \\ = \text{rd. } 1000 \text{ V}$$

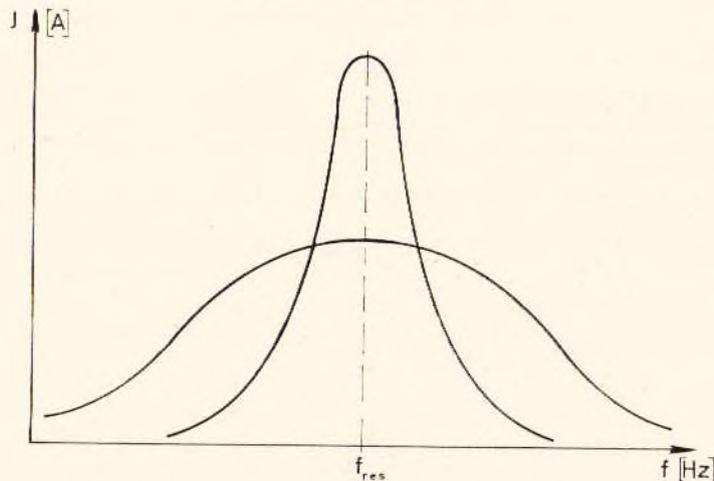
$$U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 79,6 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \\ = \text{rd. } 1000 \text{ V}$$

Das Beispiel zeigt uns, daß bei der Reihenschaltung von  $R$ ,  $L$  und  $C$  im Resonanzfall an der Spule und am Kondensator eine wesentlich höhere Spannung auftritt, obwohl die Schaltung nur an einer Netzspannung von  $220 \text{ V}$  liegt. Man nennt deshalb die Reihenresonanz auch **Spannungsresonanz**.

Wir haben bereits festgestellt, daß der gesamte Widerstand im Resonanzfall sehr gering ist, und daß bei anderen Frequenzen als der Resonanzfrequenz der Widerstand entsprechend größer ist.

Man kann also sagen, daß bei Reihenresonanz die Resonanzfrequenz wie durch ein Sieb hindurchgelassen wird, während den anderen Frequenzen ein Hindernis entgegentritt. Man kann auch sagen, die Resonanzfrequenz wird abgesogen. Man nennt deshalb den Reihenresonanzkreis auch den **Saugkreis**.

**Reihenresonanz-Kurve**



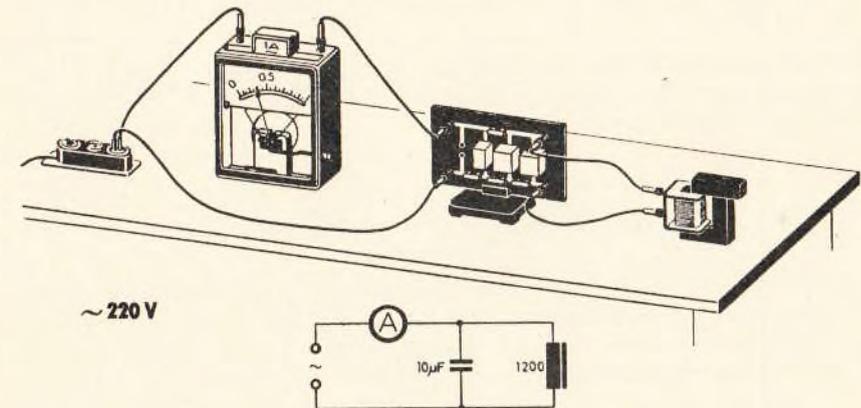
(Abb. 91)

Die Abb. 91 zeigt zwei **Resonanzkurven**. Der Idealfall wäre eine möglichst steile Kurve. In der Praxis jedoch ist dieser Idealfall nicht zu erreichen. Der Ohmsche Widerstand eines Reihenresonanzkreises wirkt sich stark dämpfend aus. Zur Erreichung einer möglichst steilen Resonanzkurve und damit eines geringen Durchlaßbereichs (unter- und oberhalb der Resonanzfrequenz) muß der Ohmsche Widerstand sehr klein gehalten werden (siehe Abb. 91).

## 2. Die Parallelresonanz

Bei dem Versuch nach Abb. 92 wollen wir der Einfachheit halber den Ohmschen Widerstand vernachlässigen, in den meisten Fällen kann man das in der Praxis auch tun.

Zuerst schließen wir einen Kondensator von  $10 \mu\text{F}$  an das Netz an; das Amperemeter zeigt etwa  $0,7 \text{ A}$  an. Legen wir statt des Kondensators eine Spule mit geschlossenem Eisenkern an das Netz, so zeigt das Instrument etwa  $0,2 \text{ A}$  an.



(Abb. 92)

Schließen wir den Kondensator **und** die Spule **parallel**, so ist der Gesamtstrom nicht etwa noch größer, sondern kleiner. Der Strom erreicht sogar bei Verringerung der Induktivität durch Zurückschieben des Joches einen Mindestwert; bei weiterem Zurückschieben des Joches steigt der Wert des Stromes wieder an.

Aus dem Versuch erkennen wir:

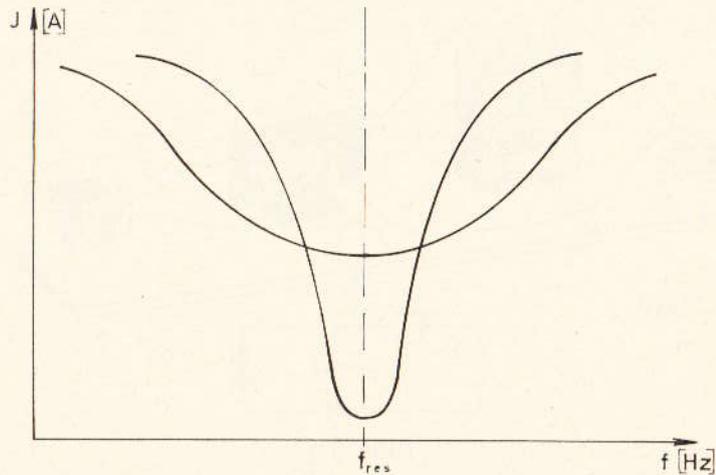
Bei der **Parallelschaltung** von induktiven und kapazitiven Widerständen ist der **Gesamtwiderstand** nicht wie bei Ohmschen Widerständen kleiner, sondern größer als einer der Teilwiderstände. Der **Gesamtwiderstand** kann im Resonanzfall einen extrem großen Wert annehmen.

Für den Resonanzfall, d. h. also auch für die Resonanzfrequenz ist der Widerstand der Anordnung sehr groß. Für alle Frequenzen unterhalb und oberhalb der Resonanzfrequenz wird der Widerstand geringer. Der **Parallelresonanzkreis** verhält sich **umgekehrt** wie der **Reihenresonanzkreis**, er **sperrt die Resonanzfrequenz**. Man nennt den Parallelresonanzkreis deshalb auch **Sperrkreis**.

Bei der Parallelschaltung von Induktivität und Kapazität fließt bei Vernachlässigung des Wirkwiderstandes reiner Blindstrom. Im Resonanzfall sind der induktive und der kapazitive Blindstrom um  $180^\circ$

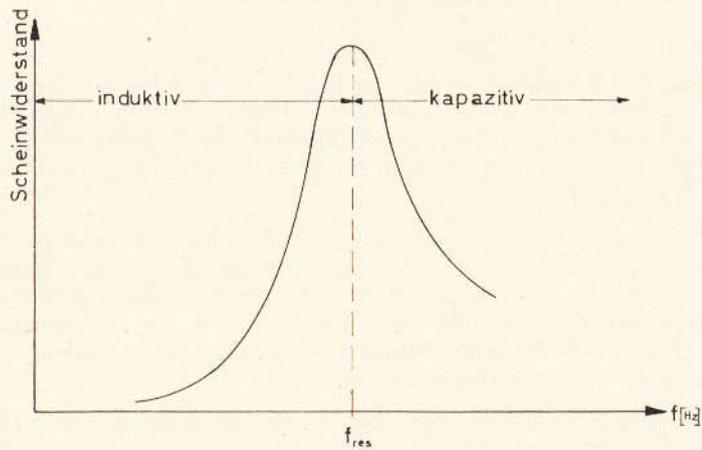
gegeneinander verschoben und heben sich damit auf (Mindestwert des Stromes beim Versuch nach Abb. 92). Man spricht deshalb auch von der **Stromresonanz**.

### Parallelresonanz-Kurve



(Abb. 93)

### Parallelresonanzkurve in Abhängigkeit vom Scheinwiderstand



(Abb. 94)

Die Resonanzkurve der Parallelresonanz (Abb. 93) verläuft umgekehrt wie die der Reihenresonanz. Die Stromwerte fallen in der Nähe der Resonanzfrequenz ab. Die Steilheit der Kurve ist wie bei der Reihenresonanz von dem im Kreis befindlichen Ohmschen Widerstand (Spulendraht) abhängig. Der Widerstand gegenüber dem Wechselstrom der Resonanzfrequenz muß daher ebenso steil ansteigen wie die Stromkurve abfällt (Abb. 94). Widerstand und Strom stehen im umgekehrten Verhältnis.

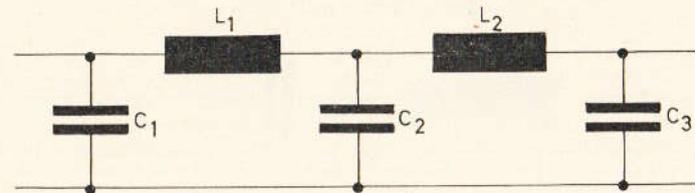
Die Kurve in Abhängigkeit des Widerstandes von der Frequenz ist unsymmetrisch, weil der induktive Teil bei Null beginnt und der kapazitive Teil im Unendlichen endet.

## IV. Elektrische Filter und Weichen

Bestimmte Schaltungen von Wechselstromwiderständen die man **elektrische Filter** nennt werden in der Fernmeldetechnik verwendet, um bestimmte Frequenzen oder auch Frequenzbänder in eine bestimmte Richtung hin durchzulassen, zu **filtern**. In **elektrischen Weichen** werden Frequenzen in mehrere Richtungen hin **aussortiert**.

### I. Das Tiefpaßfilter

Eine Schaltungsanordnung von Induktivitäten und Kapazitäten nach dem Schema der Abb. 95 nennt man **Tiefpaßfilter**. Die hintereinander geschalteten Induktivitäten  $L_1$  und  $L_2$  bezeichnet man als **Längsinduktivitäten**.



(Abb. 95)

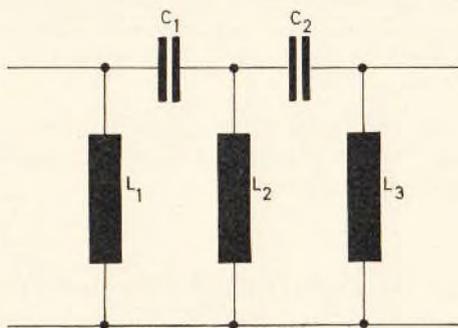
ten, während die quer zur Leitung liegenden Kapazitäten **Querkapazitäten** genannt werden.

Bei richtiger Bemessung der Größen für  $L$  und  $C$  werden, bezogen auf eine bestimmte Frequenz (**Grenzfrequenz**), höher liegende Frequenzen gesperrt und tiefer liegende durchgelassen.

Man nennt das Tiefpaßfilter wegen der Längsinduktivitäten auch **Drosselkette**.

## 2. Das Hochpaßfilter

Das Schema der Abb. 96 stellt ein **Hochpaßfilter** dar. Im Gegensatz zur Abb. 95 haben wir hier **Längskapazitäten** und **Querinduktivitäten**.



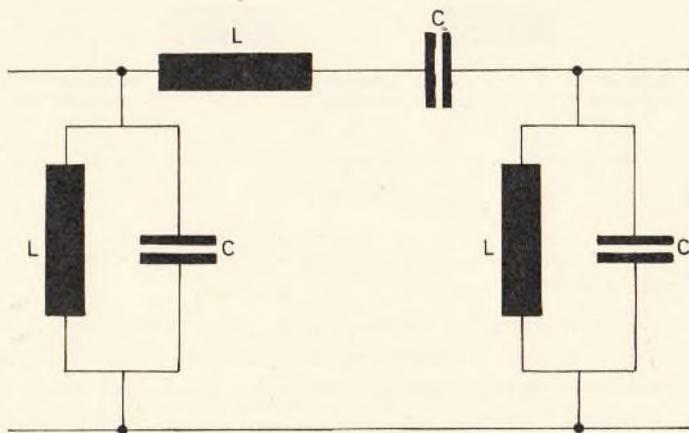
(Abb. 96)

Bei richtiger Bemessung der Größen für  $C$  und  $L$  werden die unterhalb der Grenzfrequenz liegenden Frequenzen gesperrt und die oberhalb liegenden durchgelassen.

Das Hochpaßfilter wird gegen der Längskapazitäten auch **Kondensator-kette** genannt.

## 3. Bandfilter

Ein **Bandfilter** hat die Aufgabe, ein bestimmtes **Frequenzband** (z. B. 3000 bis 6000 Hz) in eine bestimmte Richtung durchzulassen. Alle Frequenzen unterhalb und oberhalb des Frequenzbandes werden gesperrt. Es gibt

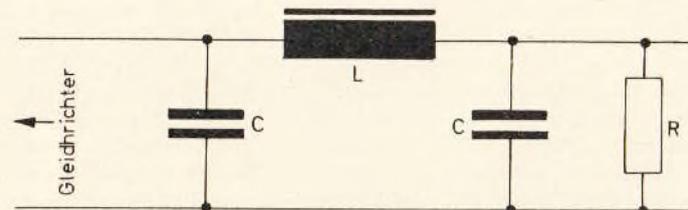


(Abb. 97)

verschiedene Schaltungsmöglichkeiten von Induktivitäten und Kapazitäten. Eine davon ist in der Abb. 97 wiedergegeben. **Die Wirkung der Bandfilter beruht oft auf der Wirkung der Reihenresonanz und der Parallelresonanz.**

## 4. Siebketten

Wie Abb. 98 zeigt, ist eine **Siebkette** ähnlich wie ein Tiefpaßfilter aufgebaut. Siebketten haben die Aufgabe, die Welligkeit des durch einen Gleichrichter gleichgerichteten Wechselstromes auszugleichen. In jeder



(Abb. 98)

Gleichrichteranlage finden wir Siebketten vor, weil z. B. zu den Röhren von Rundfunkgeräten, Verstärkern usw. und zu den Mikrofonen von Nebenstellenanlagen nur **reiner** Gleichstrom gelangen darf.

## V. Übungsaufgaben

1. Was versteht man unter dem Begriff „Zusammengesetzter Wechselstromkreis“?
2. Wie groß ist der Scheinwiderstand einer Spule, die eine Induktivität von 3 mH und einen Ohmschen Widerstand von 40 Ohm aufweist bei einer Frequenz von 1000 Hz; wie groß ist der Phasenwinkel?
3. Ein Kondensator von  $0,5\mu\text{F}$  und ein Wirkwiderstand von 40 Ohm sind bei einer Frequenz von 800 Hz hintereinander geschaltet. Wie groß sind der Scheinwiderstand und der Phasenwinkel?
4. Erläutere das Ohmsche Gesetz für Wechselstrom!
5. Am normalen Wechselstromnetz liegen ein Wirkwiderstand von 30 Ohm, eine Spule von 0,1 H und ein Kondensator von  $50\mu\text{F}$  in Reihe. Wie groß sind der Scheinwiderstand, der Phasenwinkel, der Strom und die Spannungsabfälle über den Widerständen?
6. Erkläre Widerstands-, Spannungs- und Stromdreieck!
7. Wie verhalten sich die Teilwiderstände bei Reihen- und bei Parallelschaltung von induktiven und kapazitiven Widerständen gegenüber dem Gesamtwiderstand der Schaltungsanordnung?
8. An einer Wechselspannung von 220 V und veränderlicher Frequenz liegen eine Induktivität von 0,3 H und eine Kapazität von  $30\mu\text{F}$  in Reihe; die Spule hat einen Ohmschen Widerstand von 10 Ohm. Wie groß ist die Resonanzfrequenz? Errechne den Strom im Resonanzfall und die Spannungsabfälle über den Blindwiderständen!
9. Skizziere eine Resonanzkurve für die Reihenresonanz und eine für die Parallelresonanz und erkläre sie!
10. Zu welchem Zweck werden elektrische Filter angewendet und wie ist ihr Aufbau?

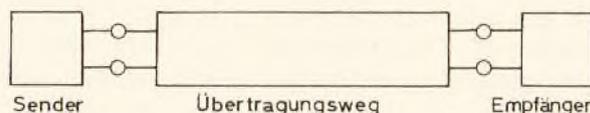
## D. Vorgänge auf elektrischen Leitungen

### I. Die Übertragung von Sprache und Zeichen

Fernmeldeanlagen dienen ganz allgemein zur Übermittlung von Nachrichten. Bei Nachrichten, die von einem Schall hervorgerufen werden (Sprache) sprechen wir von **Telephonie** und bei solchen, die mit Hilfe von Zeichen entstehen (Morsezeichen), sprechen wir von **Telegraphie**. Der Vollständigkeit halber dürfen die **Rundfunkübertragung** und die **Fernsehübertragung** nicht unerwähnt bleiben.

Für alle genannten Nachrichtenarten ist die **Übertragungsgüte** von besonderer Bedeutung. Während beim Fernsprechen **Verständlichkeit** und beim Telegraphieren **Lesbarkeit** genügen, wird bei einer Rundfunkübertragung außerdem noch **Klangtreue** und bei der Fernsehübertragung außerdem noch **Bildtreue** verlangt. Bei der Übertragung von Nachrichten kann man für alle Arten grob unterscheiden nach dem **Sender**, dem **Übertragungsweg** und dem **Empfänger**. (Abb. 99). Im Sender werden die zu übertragenen

Schema einer Fernmeldeanlage



(Abb. 99)

den Nachrichten in Ströme umgewandelt. Auf dem Übertragungsweg gelangen die Ströme zum Empfänger, der sie wiederum in wahrnehmbare Nachrichten zurückwandelt.

Als Übertragungsweg dient die Leitung oder die Funkstrecke. Wir wollen die Übertragungseigenschaften von Leitungen untersuchen.

### II. Die Übertragungseigenschaften der Leitungen

Die Übertragungsgüte einer Leitung ist von mehreren Faktoren abhängig, die in Sondergebieten wie in der Übertragungs- und Leitungstechnik eingehend behandelt werden. Im Rahmen dieses Buches sollen im Folgenden lediglich die Grundbegriffe erläutert werden, ohne auf die Theorie dieser Begriffe einzugehen.

#### 1. Die Leitfähigkeit

Über die Begriffe Leitfähigkeit und Leitwert ist im Band B 3 unter B V ausführlich gesprochen worden. Wir wollen uns hier jedoch nochmals erinnern, daß die Leitfähigkeit der umgekehrte Wert des spezifischen Widerstandes ist. Die Leitfähigkeit ist also abhängig von dem spezifischen Widerstand, von der Länge und vom Querschnitt des Leiters. So hat z. B. ein Hartkupferdraht von 3 mm  $\varnothing$  eine Leitfähigkeit von etwa 55 und ein Stahldraht des gleichen Durchmessers eine solche von etwa 7,25.

#### 2. Die Ableitung

So sehr eine gute Leitfähigkeit des stromführenden Leiters erwünscht ist, so gering soll die Leitfähigkeit des Isolationsmaterials sein. Je höher der Isolationswiderstand ist, um so geringer ist die Ableitung. Im Band B 3 haben wir bereits gelernt, daß die Ableitung der Kehrwert des Isolationswiderstandes ist ( $G = \frac{1}{R}$ ).

Die Ableitung ist außerdem noch abhängig von der Länge der Leitung, sie wächst mit zunehmender Leitungslänge.

Bei einem Isolationswiderstand von 5 M  $\Omega$  beträgt die Ableitung

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5\,000\,000} = 0,000\,005 \text{ Siemens} = 5\mu\text{S}.$$

Da Isolatoren in Freileitungslinien in trockenem Zustand einen Isolationswiderstand von etwa 5000 M  $\Omega$  haben, entspricht das einer Ableitung von 0,5  $\mu\text{S}$ . Bei Regen kann der Wert auf etwa 1  $\mu\text{S}$  ansteigen. Die Ableitung bei oberirdischen Leitungen ist also gering. Bei Kabelleitungen kann die Ableitung erheblich höher werden. Deshalb sind für Kabelleitungen folgende Mindestwerte für die Isolationswiderstände festgesetzt:

Weitverkehrskabel	1000 M $\Omega$ je km
Nahverkehrskabel	5000 M $\Omega$ je km
Ortskabel	5000 M $\Omega$ je km
Innenkabel	100 M $\Omega$ je km

Der gesamte Isolationswiderstand einer Leitung ist um so geringer, je länger die Leitung ist, weil der kilometrische Wert geteilt durch die Leitungslänge erst den Gesamtwiderstand ergibt.

#### 3. Die Leitungsinduktivität

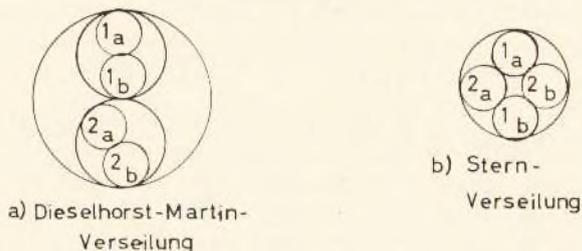
Die Leitungsinduktivität ist nur bei oberirdischen Leitungen nicht erwünscht. Bei Kabelleitungen wird sie sogar zum Herabsetzen der schädlichen Kabelkapazität künstlich hinzugeschaltet.

Die Induktivität einer oberirdischen Doppelleitung ist um so größer, je größer die Schleifenbreite und je geringer der Drahtdurchmesser sind. Sie ist bei einer Leitung aus Stahldraht größer als bei einer Kupferleitung, weil Eisen die Bildung des magnetischen Feldes begünstigt. Eine 3 mm Hartkupferleitung hat eine kilometrische Induktivität von etwa 0,002 Henry.

#### 4. Die Leitungskapazität

Die Leitungskapazität ist bei oberirdischen Leitungen zu vernachlässigen, weil die Einzelleiter mindestens 20 cm voneinander getrennt sind. Bei den dicht beieinander liegenden Kabeladern besteht jedoch die Möglichkeit der Aufladung wie bei einem Kondensator. So besteht eine Kapazität von  $2\mu\text{F}$  erst bei einer oberirdischen Doppelleitung von 300 km aber bereits bei 60 km Kabel, dessen Adern papierisoliert sind. Durch die Kabelkapazität werden Telegraphierzeichen entstellt wiedergegeben. Durch gegenseitiges Beeinflussen einzelner Sprechkreise eines Kabels entsteht **Nebensprechen**.

#### Verseilungsarten



(Abb. 100)

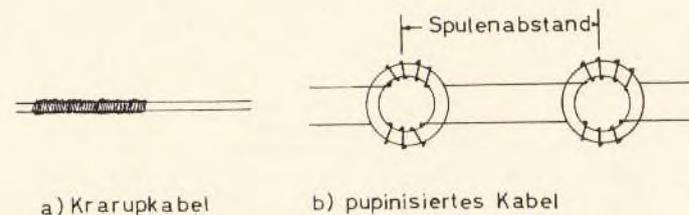
Durch Verseilung der Kabeladern (Abb. 100) wird die gegenseitige elektrische Beeinflussung zum Teil vermieden. Darüber hinaus wird die schädliche Wirkung der Kabelkapazität durch Hinzuschalten zusätzlicher Induktivität verringert. Unregelmäßigkeiten in den Kapazitäten einzelner Leiterzweige, die sich ebenfalls störend auswirken, begegnet man durch den sogenannten **Kondensatorausgleich**.

#### 5. Wechselwirkung zwischen Induktivität und Kapazität

Wie wir bereits wissen, ähneln sich Kondensator und Drosselspule in ihrem Verhalten gegenüber Wechselströmen. Jedoch sind die Vorgänge im Kondensator genau entgegengesetzt denen in der Spule. Deshalb heben

sich ihre Wirkungen unter bestimmten Voraussetzungen gegeneinander auf, wie wir es im Abschnitt C I 3 besprochen haben. Diese Tatsache macht man sich zunutze, um die Kabelkapazität zu verringern bzw. aufzuheben.

Die Induktivität des Kabels kann man auf zwei Arten erhöhen, durch das **Krarupverfahren** und durch das **Pupinverfahren**.



(Abb. 101)

Beim Krarupverfahren ist ein weicher Eisendraht in engen Windungen um den Kupferleiter herumgewickelt (Abb. 101a). Dadurch kann der Strom ein stärkeres magnetisches Feld bilden und somit die Induktivität erhöhen.

Bei dem Verfahren nach Pupin werden in bestimmten Abständen Spulen in die Leitung oder in die Kabeladern geschaltet (Abb. 101b). Der mittlere Abstand von Spule zu Spule soll 1,7 km betragen.

#### 6. Der Wellenwiderstand

Je höher die Induktivität einer Leitung ist, um so niedriger liegt die Grenzfrequenz, die noch im Kabel zu übertragen ist.

Sprechströme pflanzen sich auf einer Leitung wellenförmig fort. Es bilden sich gedämpfte Sinusschwingungen (von Strom und Spannung), die an der Leitung entlanglaufen (bildlich gesprochen). Das Verhältnis der Wellenspannung zum Wellenstrom heißt **Wellenwiderstand**. Er ist abhängig vom Wirkwiderstand, von der Induktivität, der Kapazität und von der Ableitung. Für Pupinleitungen ist der Wellenwiderstand

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

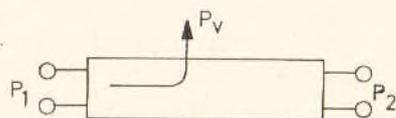
Dabei sind  $L$  und  $C$  die kilometrischen Werte der Induktivität und der Kapazität.

Die Induktivität verursacht ein langsames Fortpflanzen der wellenförmigen Sprechströme. Die Folge davon ist, daß auf langen Leitungen

ein echoartiges Nachhallen der Sprache durch Reflexion der Wellen am Leitungsende auftritt. Die hinzuzuschaltende Induktivität muß also richtig bemessen werden.

### 7. Die Dämpfung

Von der einer Leitung zugeführten Leistung  $P_1$  geht unterwegs ein Teil  $P_v$  verloren, so daß am Ende der Leitung nur noch die Leistung  $P_2$  empfangen wird. Das Verhältnis von  $P_2$  zu  $P_1$  würde man als den Wir-



(Abb. 102)

kungsgrad bezeichnen können, in der Fernmeldetechnik spricht man jedoch von dem Dämpfungsmaß  $a$  und begnügt sich meist nur mit dem Ausdruck Dämpfung.

Statt der Leistung wollen wir die Spannungen, die man am Anfang und am Ende der Leitung mißt, der Bestimmung des Dämpfungsmaßes zugrunde legen. Es gilt

$$\frac{U_1}{U_2} = e^a \text{ oder } e = \ln \frac{U_1}{U_2}$$

$e$  ist die Grundzahl der natürlichen Logarithmen und hat den Wert 2,718.

Die Einheit der Dämpfung erhält man für  $a = 1$ , wenn die gemessenen Werte für die Spannungen das Verhältnis

$$\frac{U_1}{U_2} = 2,718^1 = 2,718$$

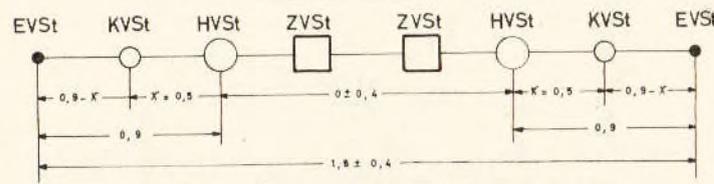
ergeben, d. h. wenn die Spannung am Leitungsanfang 2,718mal größer ist als die Spannung am Leitungsende. Als Einheit für das Dämpfungsmaß  $a$  gilt in Deutschland das Neper (N) und im Ausland das Dezibel (dB). Zum Umrechnen der beiden Maßeinheiten gilt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ N} &= 8,686 \text{ dB} \\ 1 \text{ dB} &= 0,1151 \text{ N} \end{aligned}$$

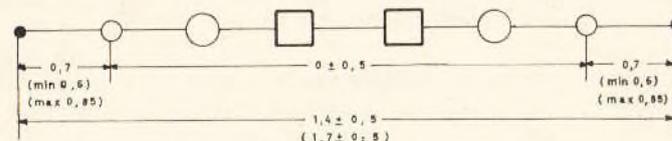
Die höchstzulässige Dämpfung zwischen zwei Fernsprechstellen darf im Höchstfall nur 3,5 Neper betragen. Von dieser Zahl ausgehend wurden für bestimmte Leitungsabschnitte höchstzulässige Dämpfungswerte festgelegt:

Für Anschlußleitungen . . . . .	$a = 0,45 \text{ N}$
Für Nebenstellenleitungen . . . . .	$a = 0,75 \text{ N}$
Für Ortsverbindungsleitungen . . . . .	$a = 1,00 \text{ N}$
Für Überweisungsleitungen . . . . .	$a = 0,50 \text{ N}$
Für SWF-Leitungen 4-dr . . . . .	$a = 0,70 \text{ N}$
Für SWF-Leitungen 2-dr . . . . .	$a = 0,35 \text{ N}$

### Dämpfungsplan 55



a) bei zweidrähtiger Durchschaltung in der KVSt



b) bei vierdrähtiger Durchschaltung in der KVSt

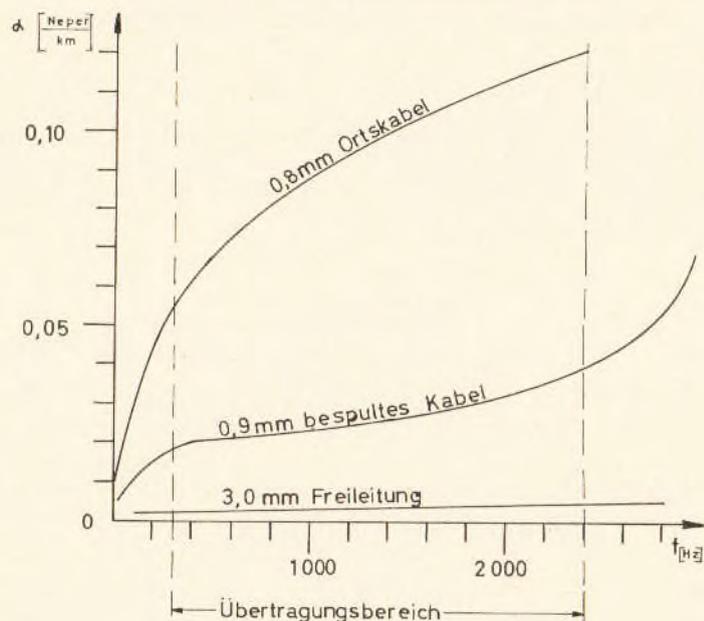
(Abb. 103)

Abb. 103 zeigt einen Dämpfungsplan für die Streckenabschnitte einer Leitung zwischen zwei Teilnehmern.

In Kabelleitungen wird die Dämpfung hauptsächlich durch den Ohmschen Widerstand und durch die Kapazität verursacht. Sie ist für höhere Frequenzen größer als für niedrige. Abb. 104 zeigt den Dämpfungsverlauf einzelner Leitungen in Abhängigkeit von der Frequenz (hier 300 bis 4000 Hz). Auf einer Freileitung können hohe und tiefe Frequenzen gleich gut übertragen werden.

Man hat für die einzelnen Leitungsarten kilometrische Dämpfungswerte (Kilometrisches Dämpfungsmaß  $\alpha$ ) festgelegt. Sie werden bei einer Frequenz von 800 Hz gemessen, das entspricht der mittleren Sprachfrequenz. Die Werte sind der Tabelle am Schluß des Buches zu entnehmen.

### Dämpfungsverlauf verschiedener Leitungen



(Abb. 104)

### 8. Verzerrungen

Beim Sprechen unterscheidet man Grundtöne und Obertöne verschiedener Frequenz, deren Amplituden in einem bestimmten Verhältnis zur Amplitude der Grundtöne stehen. Nun werden aber höhere Frequenzen stärker gedämpft als niedrige. Dadurch verlieren die Amplituden der Teilwechselströme ihr gegenseitiges Verhältnis. Es entsteht eine **Dämpfungsverzerrung**, die Sprache wird unverständlich. Dämpfungsverzerrungen nehmen mit der Länge der Leitung zu. Man hat zulässige Höchstwerte für die Dämpfungsverzerrung festgesetzt, die mit Hilfe künstlicher Leitungen oder durch Verstärker mit geeigneter Frequenzabhängigkeit eingehalten werden können.

Elektrische Vorgänge benötigen zur Ausbreitung eine bestimmte Zeit. Diese nennt man **Laufzeit**. Beim Fernsprechen kann durch zu lange Laufzeit der Teilwechselströme die Verständlichkeit der Sprache ebenfalls empfindlich gestört werden. Man spricht dann von **Laufzeitverzerrungen**.

Sie machen sich als eigentümliches Zwitschern bemerkbar. Man kann die Laufzeitverzerrungen zwar durch sogenannte Phasenausgleichsglieder beseitigen, besser ist es jedoch, diese Art der Verzerrungen von vornherein durch geeignete Bauweise der Leitungen (leichte Bepulung = Verwendung von Pupinspulen mit geringerer Induktivität) klein zu halten.

**Nichtlineare Verzerrungen** oder **Klirverzerrungen** treten auf, wenn bei der Übertragung reiner sinusförmiger Grundschwingungen zusätzliche Oberschwingungen entstehen. Solche Verzerrungen werden durch Übertrager oder Spulen mit Eisenkern oder auch durch bestimmte Arten von Verstärkerröhren hervorgerufen. Sie machen sich durch ein eigenartiges Aufhellen des Klages, durch ein Klirren, bemerkbar. Diese Art der Verzerrung kann man nicht mehr rückgängig machen. Deshalb muß man ihr Entstehen durch geeignete Konstruktion der Bauteile oder durch besondere Schaltmaßnahmen nach Möglichkeit verhindern.

### 9. Das Nebensprechen

Die ungewollte Übertragung von Sprechenergie von einer Leitung auf die andere bezeichnet man als **Nebensprechen**. Beim Nebensprechen unterscheidet man nach

- Nahnebensprechen**, wenn der störende und der gestörte Teilnehmer sich am gleichen Ende zweier parallel verlaufender Leitungen befinden,
- Gegennebensprechen**, wenn sich beide Teilnehmer an den entgegengesetzten Enden beider Leitungen befinden,
- Übersprechen**, das zwischen zwei galvanisch getrennten Leitungen (von einer Stammleitung auf die andere) auftritt und
- Mitsprechen**, das zwischen der Stammleitung und dem zugehörigen Viererstromkreis auftritt.

Durch das Nebensprechen besteht die Möglichkeit, ein Gespräch, das auf einer Leitung geführt wird, auf einer anderen abzuhören. Damit würde eine Verletzung des Fernmeldegeheimnisses eintreten. Zum anderen macht sich das Nebensprechen durch unerwünschte Geräusche störend bemerkbar und vermindert die Verständlichkeit.

Zur Verhinderung des Nebensprechens muß die Dämpfung zwischen den sich möglicherweise beeinflussenden Leitungen sehr groß gehalten werden (im Gegensatz zur Dämpfung einer Leitung im Sinne der Übertragungsgüte). Man hat hier den Begriff **Nebensprechdämpfung** geprägt und festgelegt, daß sie einen bestimmten Wert nicht unterschreiten darf. Sie soll so groß sein, daß nicht mehr als 10% der übermittelten Sätze des in der störenden Leitung geführten Gesprächs in der gestörten Leitung verstanden werden können.

Der Grundwert des Nebensprechens gibt das Verhältnis der Nutzleistung zur Störleistung am Ende der gestörten Leitung an. Dieser Grundwert darf ebenfalls bestimmte Werte nicht unterschreiten. So wird z. B. für das Nebensprechen zwischen zwei Fernsprechleitungen ein Grundwert von 7 N für ausreichend angesehen.

### 10. Die Starkstrombeeinflussung

Der Vollständigkeit halber soll noch kurz die Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Starkstrom gestreift werden.

Durch die Starkstrombeeinflussung werden in den Fernmeldeleitungen **Fremdspannungen** erzeugt, die Geräuschstörungen verursachen. Besonders unangenehme Geräuschstörungen werden durch Schaltvorgänge, Kurz- und Erdschlüsse in der Starkstromanlage oder durch atmosphärische Entladungen (Gewitter) hervorgerufen. Sie machen sich als **Knack-** oder **Knallgeräusche** bemerkbar. Sind die bei den Störungen auftretenden Ströme sehr hoch, können Menschen, die die Fernmeldeleitungen berühren, gefährdet werden. Es kann zu Durchschlägen der Isolierung zwischen Kabelader und geerdetem Bleimantel kommen.

Deshalb ist es notwendig, die Starkstrombeeinflussung zu verhindern oder sie auf eine unschädliche Größe zu verringern. Sofern die Elektrizitätsunternehmen die VDE-Vorschriften und die Angehörigen der DBP deren Starkstromschutz-Vorschriften beachten, wird die Beeinflussung auf einem erträglichen Maß gehalten.

## III. Die Mehrfachausnutzung von Leitungen

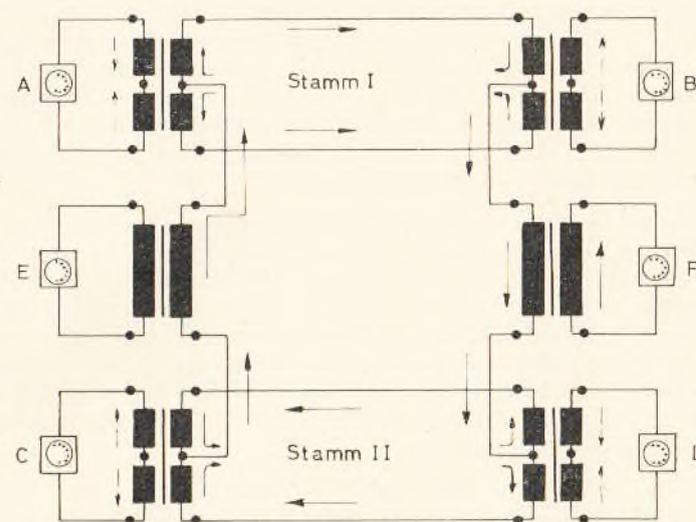
Fernmeldeleitungen werden als teurer Bestandteil einer Fernmeldeanlage zur besseren Wirtschaftlichkeit mehrfach ausgenutzt durch Phantomschaltungen oder durch die Trägerfrequenztechnik.

### I. Die Phantomschaltung

Die Abb. 105 zeigt eine Phantom- oder Viererschaltung. Zwei Doppelleitungen (Stamm I und Stamm II) werden an ihren Enden mit einem **Fernleitungsübertrager** abgeschlossen. Die Primärseiten der Übertrager sind (unter Einschaltung der Amtseinrichtungen) mit den Teilnehmern A, B, C und D verbunden. Die Sekundärseiten bilden den Abschluß der Fernleitungen. Wir können jetzt mit Hilfe zweier weiterer Übertrager einen dritten Sprechkreis schaffen, ohne den Sprechverkehr auf den **Stammleitungen** zu stören.

An die Primärseiten der beiden zusätzlichen Übertrager werden die Teilnehmer E und F angeschlossen. Die Sekundärklemmen werden mit den **Mitten** der Sekundärwicklungen der Übertrager in den Stämmen I und II verbunden, wie es Abb. 105 zeigt. Diesen neu geschaffenen dritten Sprechkreis nennt man **Vierer** oder **Phantom**.

### Die Phantom- oder Viererschaltung



(Abb. 105)

Mit Hilfe der in die Abb. 105 eingezeichneten Pfeile soll die Wirkungsweise dieser Schaltung erläutert werden:

Sobald der Teilnehmer E spricht, fließt Sprechwechselstrom in Richtung des Pfeiles zur Mitte des Übertragers, der den Stamm I in Richtung des Teilnehmers A abschließt. Hier verzweigt er sich zu gleichen Teilen, deren Hälften über die Zweige a und b der Stammleitung I zum Übertrager dieser Leitung in Richtung Teilnehmer B fließen. Der Stromweg führt weiter über den Sekundärteil des Übertragers zum Teilnehmer F, dann zum Sekundärteil des Übertragers zum Teilnehmer D, hier wieder Verzweigung und Weiterfluß der Hälften über a- und b-Zweig der Leitung II zur Sekundärseite des Übertragers zum Teilnehmer E. Teilnehmer E kann also mit Teilnehmer F sprechen. Die Teilnehmer A, B, C und D können jedoch von dem zwischen E und F geführten Gespräch nichts wahrnehmen, weil die Zweigströme durch die Wicklungshälften ihrer zugehörigen Übertrager gleich groß sind und entgegengesetzte Richtung haben, so daß sie sich in ihrer Induktionswirkung in den Primärseiten aufheben.

## 2. Die Trägerfrequenztechnik

Die Trägerfrequenztechnik hat ihre Anfänge zur Zeit des ersten Weltkrieges. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, mehrere Nachrichten auf einer Leitung gleichzeitig zu übertragen. Dazu bedarf es besonderer Geräte, der **Trägerfrequenzgeräte** (Tf-Geräte). Mit Hilfe dieser Geräte werden die Nachrichten nicht in ihrer natürlichen Frequenzlage (Sprache 300 bis 4000 Hz) auf den Übertragungsweg gegeben, sondern im Sendeteil des Gerätes in eine höhere Lage (z. B. Träger mit 200 kHz) verschoben. Nach der Übertragung werden sie im Empfangsteil des fernen Gerätes wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückgewandelt. Diesen Vorgang nennt man **Frequenzumsetzung**. Sie geschieht unter Verwendung von **Modulatoren**, denen sogenannte **Trägerströme** zugeführt werden. **Filter** bewirken, daß nur das für die Übertragung einer bestimmten Nachricht erforderliche Frequenzband durchgelassen wird.

Die Leitung, die trägerfrequenzmäßig ausgenutzt werden soll, nennt man **Grundleitung**. Sie ist im allgemeinen eine Stammeleitung (Doppelleitung), kann aber auch als Vierer geschaltet sein. Die Grundleitung muß oft für den Einsatz von Trägerfrequenzgeräten besonders hergerichtet werden, weil unter Umständen nicht nur Tf-Gespräche auf ihr übertragen werden sollen, sondern auch noch ein normales Nf-Gespräch (Niederfrequentes Gespräch, normale Frequenzlage). In den Tf-Endämtern müssen deshalb sowohl Nf- als auch Tf-Einrichtungen über **Frequenzweichen** an die Grundleitung geschaltet werden.

Obwohl Trägerfrequenzbetrieb auf jeder Stammeleitung- oder Vierschaltung einer normalen Freileitung und im Kabel möglich ist, wurden im Laufe der Entwicklung besondere Kabel hergestellt. Diese **Tf-Kabel** haben meist einen koaxialen Kern (bestehend aus Hin- und Rückleitung) und einen aus mehreren Viererseilen bestehenden Beipack (s. auch Band C3). Auf Kabeln dieser Art ist eine gleichzeitige Übertragung bis zu 1500 Vierdrahtstromkreisen möglich.

### IV. Übungsaufgaben

1. Welche drei Einrichtungen unterscheidet man bei der Übertragung von Nachrichten? 2. Was versteht man unter Leitfähigkeit und Ableitung? 3. Erkläre den Unterschied zwischen Krarup- und pupinisiertem Kabel 4. Wie wirken sich Induktivität und Kapazität auf die Übertragungsgüte aus? 5. Was versteht man unter dem Dämpfungsmaß einer Leitung? 6. Was ist Neper und was Dezibel? 7. Welche Art von Verzerrungen gibt es? 8. Erkläre den Begriff Nebensprechdämpfung und Grundwert des Nebensprechens! 9. Skizziere die Phantomschaltung und erläutere sie! 10. Was versteht man unter Trägerfrequenzfernsprechen?

### Band B 4 — Die Fachkunde

Die Wechselstromlehre

### Band B 5 — Die Fachkunde

Elektrische Meßgeräte und Meßschaltungen

### Band C 1 — Die handwerkliche Ausbildung

Werkstoffe der Fernmeldetechnik und ihre Bearbeitung —  
Werkzeuge und Werkzeugmaschinen

### Band C 2 — Die handwerkliche Ausbildung

Der oberirdische Linienbau

### Band C 3 — Die handwerkliche Ausbildung

Der unterirdische Linienbau

### Band C 4 — Die handwerkliche Ausbildung

Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen

### Band C 5 — Die handwerkliche Ausbildung

Grundzüge der Wählvermittlungstechnik

### Band C 6 — Die handwerkliche Ausbildung

Nebenstellenanlagen

### Band C 7 — Die handwerkliche Ausbildung

Sprechstellenbau

*Umfang je Band etwa 140 Seiten*

**Preis je Band 3,95 DM**

— Weitere Lehr- und Lernwerke siehe 2. und 4. Umschlagseite —

## Anhang:

Tabelle der Sinus-, Cosinus- und Tangenswerte

Grad	sin	cos	tg	Grad	sin	cos	tg
0	0,000	1,000	0,000	45	0,707	0,707	1,000
1	0,017	1,000	0,017	46	0,719	0,695	1,036
2	0,035	0,999	0,035	47	0,731	0,682	1,072
3	0,052	0,999	0,052	48	0,743	0,669	1,111
4	0,070	0,998	0,070	49	0,755	0,656	1,150
5	0,087	0,996	0,087	50	0,766	0,643	1,192
6	0,105	0,995	0,105	51	0,777	0,629	1,235
7	0,122	0,993	0,123	52	0,788	0,616	1,280
8	0,139	0,990	0,141	53	0,799	0,602	1,327
9	0,156	0,988	0,158	54	0,809	0,588	1,376
10	0,174	0,985	0,176	55	0,819	0,574	1,428
11	0,191	0,982	0,194	56	0,829	0,559	1,483
12	0,208	0,978	0,213	57	0,839	0,545	1,540
13	0,225	0,974	0,231	58	0,848	0,530	1,600
14	0,242	0,970	0,249	59	0,857	0,515	1,664
15	0,259	0,966	0,268	60	0,866	0,500	1,732
16	0,276	0,961	0,287	61	0,875	0,485	1,804
17	0,292	0,956	0,306	62	0,883	0,469	1,881
18	0,309	0,951	0,325	63	0,891	0,454	1,963
19	0,326	0,946	0,344	64	0,899	0,438	2,05
20	0,342	0,940	0,364	65	0,906	0,423	2,14
21	0,358	0,934	0,384	66	0,914	0,407	2,25
22	0,375	0,927	0,404	67	0,921	0,391	2,36
23	0,391	0,921	0,424	68	0,927	0,375	2,48
24	0,407	0,914	0,445	69	0,934	0,358	2,61
25	0,423	0,906	0,466	70	0,940	0,342	2,75
26	0,438	0,899	0,488	71	0,946	0,326	2,90
27	0,454	0,891	0,510	72	0,951	0,309	3,08
28	0,469	0,883	0,532	73	0,956	0,292	3,27
29	0,485	0,875	0,554	74	0,961	0,276	3,49
30	0,500	0,866	0,577	75	0,966	0,259	3,73
31	0,515	0,857	0,601	76	0,970	0,242	4,01
32	0,530	0,848	0,625	77	0,974	0,225	4,33
33	0,545	0,839	0,649	78	0,978	0,208	4,70
34	0,559	0,829	0,675	79	0,982	0,191	5,15
35	0,574	0,819	0,700	80	0,985	0,174	5,67 <sup>1)</sup>
36	0,588	0,809	0,727	81	0,988	0,156	6,31
37	0,602	0,799	0,754	82	0,990	0,139	7,12
38	0,616	0,788	0,781	83	0,993	0,122	8,14
39	0,629	0,777	0,810	84	0,995	0,105	9,51

**Band B 4 — Die Fachkunde**

Die Wechselstromlehre

**Band B 5 — Die Fachkunde**

Elektrische Meßgeräte und Meßschaltungen

**Band C 1 — Die handwerkliche Ausbildung**Werkstoffe der Fernmeldetechnik und ihre Bearbeitung —  
Werkzeuge und Werkzeugmaschinen**Band C 2 — Die handwerkliche Ausbildung**

Der oberirdische Linienbau

**Band C 3 — Die handwerkliche Ausbildung**

Der unterirdische Linienbau

**Band C 4 — Die handwerkliche Ausbildung**

Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen

**Band C 5 — Die handwerkliche Ausbildung**

Grundzüge der Wählvermittlungstechnik

**Band C 6 — Die handwerkliche Ausbildung**

Nebenstellenanlagen

**Band C 7 — Die handwerkliche Ausbildung**

Sprechstellenbau

Umfang je Band etwa 140 Seiten

**Preis je Band 3,95 DM**

— Weitere Lehr- und Lernwerke siehe 2. und 4. Umschlagseite —

# Deutsch und Rechnen

---

*Wichtig zur Vorbereitung  
auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen*

## Deutsch

Rechtschreibung — Wortlehre — Satzlehre  
Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde  
Umfang 120 Seiten **Preis 2,50 DM**

## Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Algebra  
Übungs- und Prüfungsaufgaben — Lösungs-  
heft  
Umfang 160 Seiten **Preis 3,20 DM**

— Weitere Lehr- und Lernwerke siehe 2. und 3. Umschlagseite —

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei

**DEUTSCHE POSTGEWERKSCHAFT, VERLAG GMBH.**

**6 Frankfurt (Main) — Savignystraße 29**