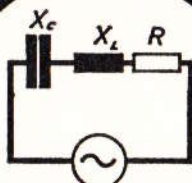
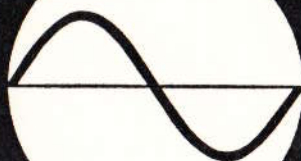
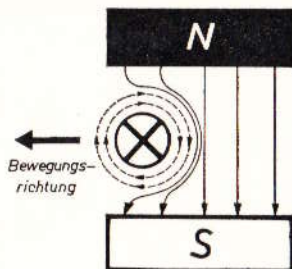


Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —



$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$



Band B 4

(Teil 1)

Wechselstromlehre

Joachim Galster
8551 Gosberg 88

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —

17

wichtige Lehr- und Lernwerke für den Flehrl; auch für den Handwerker F und den Fernmeldehandwerker zur Vorbereitung auf die Grundlehrgänge Ft 1 und 2 gut geeignet!

- Band A 1** — **Allgemeine Berufskunde**
Weg und Ziel der Ausbildung — Lehrvertrag — Fernmeldehandwerkerprüfung — Tarifvertrag — Gesetze und Verordnungen des Fernmeldewesens
- Band A 2** — **Allgemeine Berufskunde**
Allgemeines über den Staatsaufbau — Aufgaben und Gliederung der DBP — Sozialeinrichtungen bei der DBP — Musterausarbeitungen und Musterthemen
- Band B 1** — **Grundkenntnisse der Mathematik und Physik**
Erklärung der Grundgrößen der Physik — Buchstabenrechnen — Lösen von Gleichungen — Umstellen von Formeln
- Band B 2** — **Fachzeichnen in der Fernmeldetechnik**
(mit Beiheft) Technisches Zeichnen — Stromlaufzeichnen — Planunterlagen und Zeichnen in der Linientechnik
- Band B 3** — **Gleichstromlehre**
Wesen der Elektrizität — Größen, Einheiten und Gesetze im Gleichstromkreis — Wirkungen des elektrischen Stromes — Arten der Spannungserzeugung — Elektrisches Feld — Kondensator
- Band B 4** — **Wechselstromlehre**
(2 Teile) Dauermagnetismus — Elektromagnetismus — Fremdinduktion — Selbstinduktion — Entstehung des Wechselstromes — Wechselstromwiderstände — Stromversorgungsanlagen — Vorgänge auf elektrischen Leitungen — Elektronenröhren
- Band B 5** — **Meßgeräte und Meßschaltungen**
Meßtechnik und Meßübungen — Entstörungs- und Prüftechnik
- Band B 6** — **Beispiele und Aufgaben aus der Fernmeldetechnik**
(2 Teile) Übungsbeispiele und Aufgabensammlung aus der Physik und der Gleich- und Wechselstromlehre — Berechnen elektrischer Größen in Schaltungen der Fernmeldetechnik

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik — Buchreihe AFt —

Herausgegeben mit Unterstützung
des Bundesministers für das Post- und Fernmeldewesen

Band B 4

(Teil 1)

Wechselstromlehre

Magnetismus und seine Größen; Wirkungen des Magnetismus
(Kraftwirkung, Induktionsvorgänge, Bewegung durch Induktion);
Entstehung des Wechselstromes; Wechselstromwiderstände;
Leistung im Wechselstromkreis; Resonanz; Filter

5., verbesserte und erweiterte Auflage

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag
6 Frankfurt 1 — Savignystraße 43

Joachim Galster
8551 Gosberg 88

Vorwort

Die siebzehn Bände des „Handbuchs der Fernmeldetechnik — Buchreihe Aft —“ sollen

1. den Fernmeldelehrlingen während der Lehrzeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen,
2. den Fernmeldearbeitern bei der Vorbereitung auf die Prüfung nach dem Tarifvertrag, § 10, behilflich sein,
3. den Handwerkern aus artverwandten Berufen aufzeigen, welches Fachwissen erforderlich ist, um genauso viel zu wissen wie die Lehrlinge am Ende ihrer Lehrzeit,
4. den Fernmeldehandwerkern die Möglichkeit geben, ihr Wissen aufzufrischen und es auf den neuesten Stand der Fernmeldetechnik zu bringen und
5. eine ausreichende Vorbereitung auf den Lehrstoff der dienstlichen Grundlehrgänge gewährleisten.

In der Fernmeldehandwerkerprüfung sowie in den Grundlehrgängen Ft 1 und 2 müssen neben den praktischen Fertigkeiten auch die theoretischen Fachkenntnisse über die Fernmeldetechnik vorhanden sein. Das gleiche gilt hinsichtlich der Kenntnisse in dem wichtigen Prüfungsfach „Allgemeine Berufskunde“ sowie in bezug auf die Grundkenntnisse über die für das Fernmeldewesen wichtigen Gesetze und Verordnungen wie FAG, TWG und FeO. Einer der Bände allein kann dem Leser dieses umfangreiche Wissen nicht vermitteln; alle siebzehn Bände zusammen (vgl. hierzu die Angaben auf der 2. und 3. Umschlagseite) enthalten jedoch das Fachwissen, das sich der Leser im Interesse des Prüfungserfolges und seines weiteren Aufstiegs aneignen muß. In dem „Handbuch der Fernmeldetechnik“ 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 Fernmeldearbeiter,
für den Handwerker aus artverwandten Berufen und
für den Fernmeldehandwerker

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

Stand: Sommer 1970

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

Hinweis

Der Band B 4 „Die Wechselstromlehre“ des „Handbuchs der Fernmeldetechnik — Buchreihe Aft“ besteht aus den Teilen 1 und 2.

Der Lehrstoff ist wie folgt gegliedert:

Teil 1 Physikalische Grundlagen zur Wechselstromlehre

Teil 2 Anwendungsbereiche der Wechselstromlehre

Beide Teile des Bandes B 4 stellen ein Ganzes dar und umfassen den Lehrstoff, den der Lernende beherrschen muß. In dem Teil 2 des vorgenannten Bandes werden u. a. folgende Sachgebiete behandelt:

Elektrische Maschinen,
Transformatoren,
Fernmeldeübertrager,
Gleichrichter,
Stromversorgung von FM-Anlagen,
Schutzmaßnahmen gegen Berührungsspannungen,
Elektroakustik,
Leitungstechnik,
Elektronenröhren.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Der Magnetismus und seine Größen	
1.1. Der Dauermagnetismus	7
1.1.1. Die Naturerscheinung „Magnetismus“	7
1.1.2. Form und Aufbau der Magnete	7
1.1.3. Das magnetische Feld	11
1.1.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.1.	13
1.2. Der Elektromagnetismus	13
1.2.1. Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters	13
1.2.2. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum	15
1.2.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.2.	17
1.3. Was ist Magnetismus?	17
1.3.1. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.3.	19
1.4. Eisen im Magnetfeld	20
1.4.1. Die magnetische Influenz	21
1.4.2. Die magnetische Abschirmung	22
1.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.4.	23
1.5. Die Größen des magnetischen Feldes	23
1.5.1. Die magnetische Durchflutung Θ	24
1.5.2. Die magnetische Feldstärke H	27
1.5.3. Die magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität) μ	30
1.5.4. Die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion B	32
1.5.5. Der magnetische Fluß Φ	35
1.5.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.5.	36
1.6. Hystereseschleife und Magnetisierungskurve	36
1.6.1. Die Hystereseschleife	36
1.6.2. Magnetisierungskurven	39
1.6.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.6.	42
1.7. Vergleich elektrischer Stromkreis – magnetischer Kreis	43
1.8. Anwendungsbeispiele (Bauteile mit elektromagnetischer Wirkung)	44
1.8.1. Das Relais	44
1.8.2. Der Wecker	45
1.8.3. Der Fernhörer	47
2. Die Wirkungen des Magnetismus	
2.1. Die Kraftwirkung auf Eisen im Magnetfeld	48
2.2. Die Fremdinguktion	49
2.2.1. Die Induktion der Bewegung	49
2.2.2. Die Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)	55
2.2.3. Wirbelströme	60
2.2.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2.	63

	Seite
2.3. Die Selbstinduktion	64
2.3.1. Die Richtung des Selbstinduktionsstromes	65
2.3.2. Die Höhe der Selbstinduktionsspannung	66
2.3.3. Die Induktivität	66
2.3.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.3.	69
2.4. Bewegung durch Induktion	70
2.4.1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	70
2.4.2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld	72
2.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.4.	74
3. Grundlagen der Wechselstromlehre	
3.1. Die Entstehung des Wechselstromes	75
3.1.1. Die bewegte Spule im Magnetfeld	75
3.1.2. Der Verlauf der Wechselspannung	76
3.1.3. Die Periode und die Frequenz	78
3.1.4. Effektiv- und Maximalwerte	79
3.1.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.1.	81
3.2. Wechselstromwiderstände	81
3.2.1. Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis	81
3.2.2. Die Spule im Wechselstromkreis	82
3.2.3. Der Kondensator im Wechselstromkreis	95
3.2.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.2.	101
3.3. Der Mehrphasenwechselstrom	101
3.3.1. Der Drehstrom	101
3.3.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.3.	106
4. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis	
4.1. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen	107
4.1.1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand	107
4.1.2. Wirkwiderstand und kapazitiver Widerstand	109
4.1.3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand	110
4.1.4. Das Widerstandszeigerdiagramm	113
4.1.5. Das Spannungszeigerdiagramm	114
4.1.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.1.	115
4.2. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen	115
4.3. Die Leistung im Wechselstromkreis	115
4.3.1. Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstandes	117
4.3.2. Leistungsaufnahme einer Induktivität	119
4.3.3. Leistungsaufnahme einer Kapazität	120
4.3.4. Leistungsaufnahme einer Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderstand	122
4.3.5. Folgerungen aus den Beispielen 4.3.1. bis 4.3.4.	123
4.3.6. Die Drehstromwirkleistung	127
4.3.7. Messung der Wirkleistung	128
4.3.8. Phasenkompensation	129
4.3.9. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.3.	130

	Seite
4.4. Die Resonanz	131
4.4.1. Die Reihenresonanz	131
4.4.2. Die Parallelresonanz	135
4.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.4.	137
4.5. Elektrische Filter und Weichen	137
4.5.1. Der Tiefpaß	137
4.5.2. Der Hochpaß	138
4.5.3. Bandfilter (Bandpaß)	139
4.5.4. Siebketten	139
4.5.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.5.	140
Physikalische Einheiten	140
Anhang: Tabelle der Sinus-, Cosinus- und Tangenswerte	141

1. Der Magnetismus und seine Größen

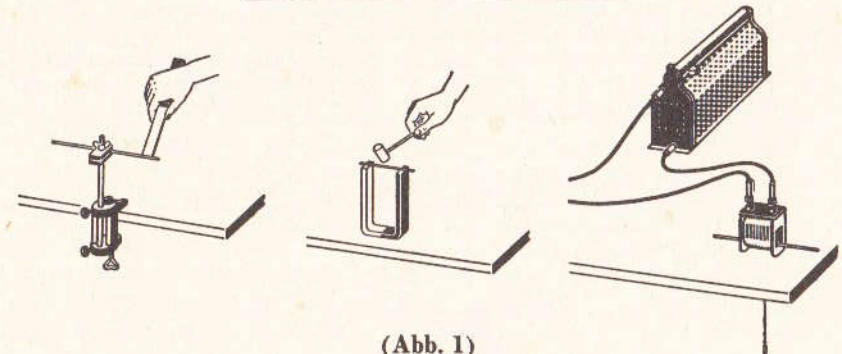
1.1. Der Dauermagnetismus

1.1.1. 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



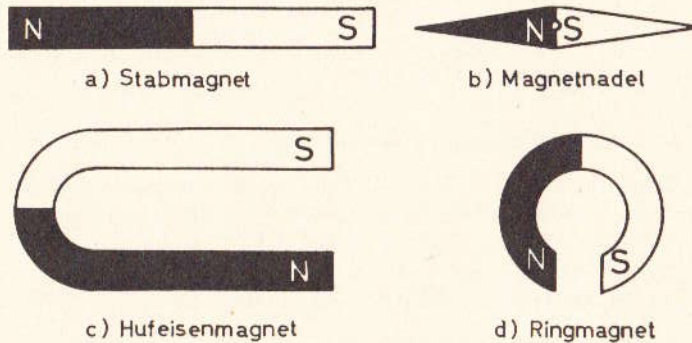
(Abb. 1)

- 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.

1.1.2. Form und Aufbau der Magnete

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

Magnetformen

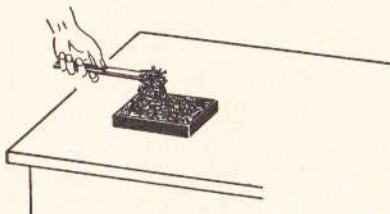


(Abb. 2)

1.1.2.1. 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. Die gleiche Erscheinung tritt auf, wenn wir den Stabmagneten umdrehen und das andere Ende über die Nägel halten.

Kraftwirkung am Magnetpol

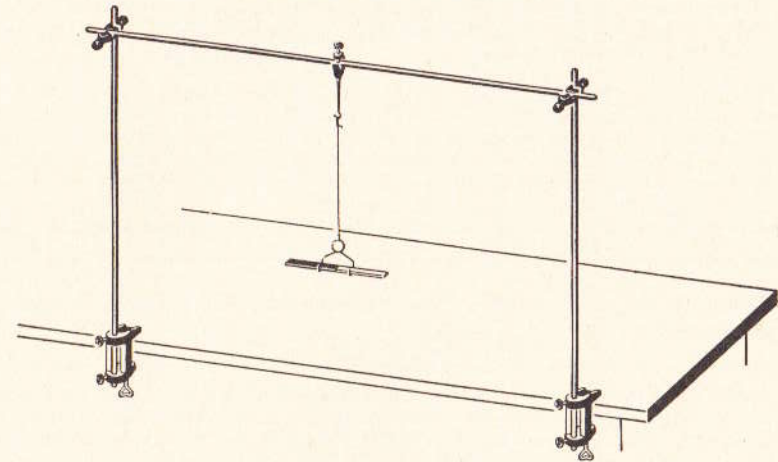


(Abb. 3)

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

Wir wollen einen weiteren Versuch nach Abb. 4 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 Magneten) nach Norden und der andere nach Süden.

Die Richtkraft eines Magneten

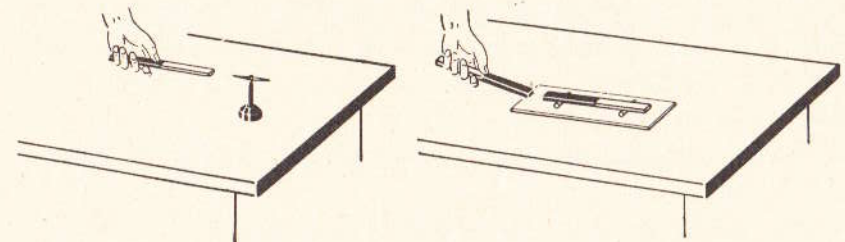


(Abb. 4)

Man nennt 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 Pol angibt.

Aus der ursprünglichen Festlegung, daß der Magnet-Nordpol nach Norden weist, ergibt sich nun, daß z. B. beim geographischen Nordpol der erdmagnetische Südpol liegen muß. Den Beweis dafür führen wir mit Hilfe eines Versuchs nach Abb. 5.

Die Wechselwirkung zweier Magnete



(Abb. 5)

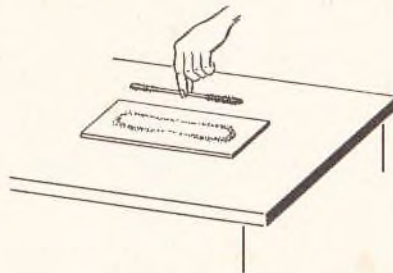
Zwischen zwei Magneten besteht eine Wechselwirkung, die uns die Abb. 5 veranschaulichen soll. Im linken Bild wird dem Nordpol einer Magnetnadel der Nordpol eines Stabmagneten genähert – die Nadel weicht aus; wird nun dem Nordpol der Nadel der Südpol des Stabmagneten genähert, so folgt die Nadel den Hin- 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 gewonnenen Erkenntnis ergibt sich die Grundregel:

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

Wir wollen jetzt statt des Stabmagneten eine magnetisierte Stricknadel verwenden und sie mit feinen Eisenfeilspänen bestreuen (Abb. 6). 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 Stricknadel.



(Abb. 6)

Mit einer Magnetnadel können wir nachweisen, daß sowohl die ganze magnetisierte Stricknadel als auch nach der Teilung beide Hälften je einen Nord- und einen Südpol besitzen. Teilen wir eine Hälfte nochmals und wiederholen mit je einem Viertel der ursprünglichen Stricknadel den Versuch, so stellen wir wieder an jedem Teilstück je einen Nord- und einen Südpol fest. Die Teilung der Nadel können wir praktisch beliebig weitertreiben.

Daraus können wir folgern:

- a) Zu jedem magnetischen Nordpol gehört ein magnetischer Südpol,
- b) eine Trennung der Magnetpole ist nicht möglich (wie etwa eine Trennung von positiven und negativen elektrischen Ladungen),

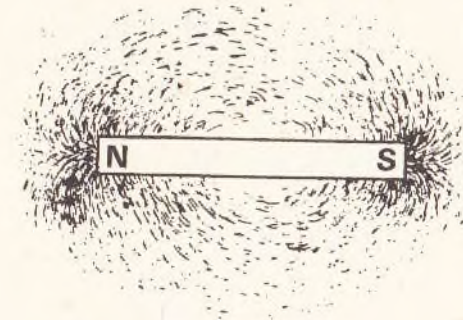
- c) es gibt keinen Überschuß von magnetischen Nord- oder Südpolen,
- d) jeder Magnet muß aus einer Vielzahl von Teilmagneten bestehen (siehe Teilung der Stricknadel).

Diese Teilmagnete werden als Molekularmagnete bezeichnet.

1.1.3. Das magnetische Feld

Im Versuch nach Abb. 7 wird auf einen Stabmagneten eine Glasplatte oder ein Bogen Zeichenkarton gelegt, auf die wir feine Eisenspäne streuen. Wir klopfen leicht an die Scheibe und sehen, daß die Späne sich zu Linien formieren, die ihren Ausgang an den Polen haben und die sich in einem weiten Bogen schließen.

Feldlinienbild eines Stabmagneten



(Abb. 7)

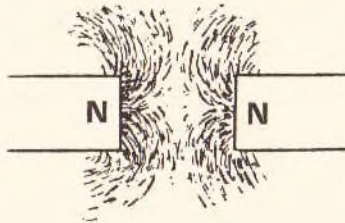
Diese Linien zeigen die Form des magnetischen Feldes an, man nennt sie deshalb magnetische Feldlinien.

Um einen Magneten ist der ihn umgebende Raum vollständig mit Feldlinien angefüllt; der Magnet ist von einem Wirkungsfeld, von dem magnetischen Feld, umgeben. In diesem Feld durchlaufen die Feldlinien auch das Innere (den Werkstoff) des Magneten und bilden somit einen geschlossenen Linienzug. Sie haben keinen Anfang und kein Ende.

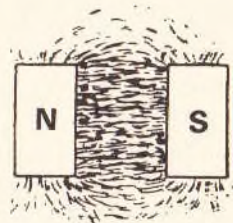
Zur Festlegung einer bestimmten, einheitlichen Richtung hat man vereinbart:

Magnetische Feldlinien treten aus dem Nordpol eines Magneten aus und in den Südpol wieder ein.

Die Feldlinie dient dabei nur als bildliche Hilfsvorstellung für den Raum, in dem magnetische Wirkungen nachgewiesen werden können. In Wirklichkeit gibt es keine Feldlinien.

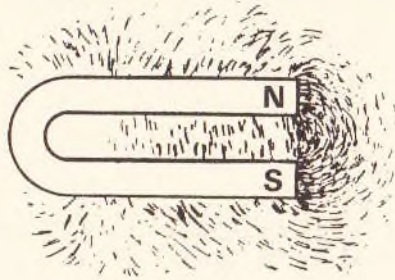
Gleichnamige Pole

(Abb. 8)

Ungleichnamige Pole

(Abb. 9)

Die in Abb. 5 gezeigte Wechselwirkung zweier Magneten wird durch die in den Abb. 8 und 9 gezeigten Feldlinienbilder verdeutlicht. Während sich beim Gegenüberstehen gleichnamiger Pole (Abb. 8) die Feldlinien abstoßen, gehen sie beim Gegenüberstehen ungleichnamiger Pole (Abb. 9) ineinander über (sie ziehen sich gegenseitig an).

Feldlinienbild eines Hufeisenmagneten

(Abb. 10)

Abb. 10 zeigt den Feldlinienverlauf bei einem Hufeisenmagneten. Zwischen den Schenkeln des Magneten erkennen wir parallel verlaufende, nicht streuende Feldlinien. Außerhalb der Schenkel verlaufen die Feldlinien in einem weiten Bogen vom Nord- zum Südpol. Hier ist das Feld nicht mehr von dichtgeschlossenen und parallel verlaufenden Feldlinien durchzogen, sondern es wird um so aufgelockerter, je weiter es von den Magnetpolen entfernt ist. Die Feldlinien streuen weit und durchziehen einen weiten Luftweg. Man spricht hier auch von dem **Streufeld** eines Magneten.

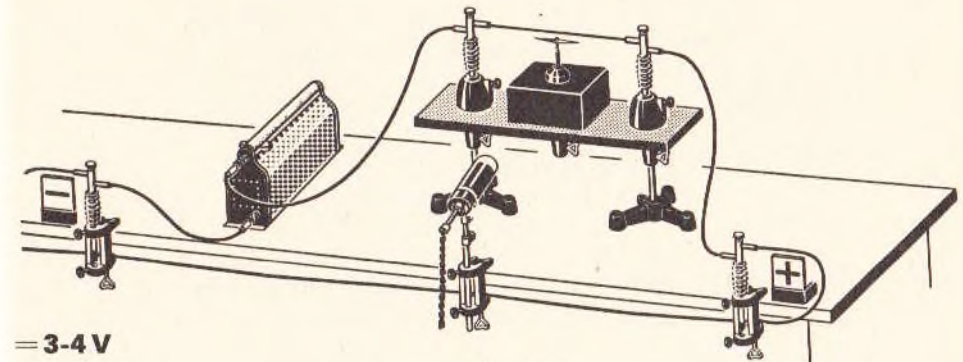
Ein Magnetfeld wird als **homogenes**¹⁾ Magnetfeld bezeichnet, wenn die Feldliniendichte in einer Fläche völlig gleichmäßig ist, im Gegensatz zum inhomogenen Feld, bei dem die Feldliniendichte in der Fläche ungleichmäßig verteilt ist.

1.1.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.1.

1. Welche Magnetformen sind in der Technik gebräuchlich? 2. Wie kann man sehr einfach nachweisen, ob ein Material magnetisch ist? 3. Auf welche Weise lassen sich Stahlmagnete herstellen? 4. Welche Kraft-Wechselwirkung besteht zwischen Magnetpolen? 5. Welche Folgerungen lassen sich aus der Tatsache ziehen, daß nach der Teilung eines Magneten (z. B. magnetisierte Stricknadel) jedes Teilstück magnetische Wirkungen und Pole zeigt? 6. Erläutern Sie die Begriffe magnetisches Feld und magnetische Feldlinie! 7. Was versteht man unter einem homogenen Magnetfeld? 8. Skizzieren Sie die Feldlinienbilder für Magnetfelder zwischen zwei gleichnamigen und zwei ungleichnamigen Magnetpolen!

1.2. Der Elektromagnetismus**1.2.1. Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters**

Ein Leitungsdraht wird nach Abb. 11 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 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

Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

(Abb. 11)

¹⁾ homogen (griech.) = gleichartig

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. Kehrt man die Stromrichtung im Leiter um, so kehrt sich auch die Ablenkungsrichtung der Magnetonadel um.

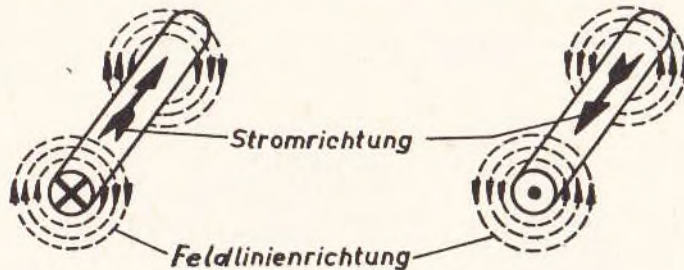
Anschließend wollen wir den Leiter senkrecht durch ein Stück Zeichenkarton führen und den Karton mit Eisenfeilspänen bestreuen. Lassen wir jetzt durch den Leiter einen kräftigen Gleichstrom (ca. 10 A) fließen und klopfen vorsichtig an den Karton, so ordnen sich die Späne in der Nähe des Leiters zu konzentrischen Kreisen, die den Leiter umschließen.

1.2.1.1. Die Feldlinienrichtung um einen stromdurchflossenen Leiter: Korkenzieherregel

Wir wollen uns vorstellen, daß der Strom sich wie ein Pfeil durch den Leiter bewegt. Wenn wir in seiner Bewegungsrichtung hinter dem Pfeil herschauen, 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 Feldlinien des um den Leiter befindlichen Magnetfeldes rechtsherum (im Uhrzeigersinn) (Abb. 12 links). Sieht man gegen die Richtung des Stromes (dem Pfeil entgegen), so verlaufen die Feldlinien des Feldes linksherum (entgegen dem Uhrzeigersinn) (Abb. 12 rechts).

Feldlinienrichtung um einen stromdurchflossenen Leiter.



(Abb. 12)

Aus dieser Anschauung läßt sich die sog. **Korkenzieherregel** ableiten:

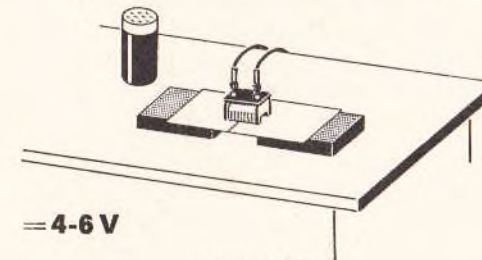
Denkt man sich einen Korkenzieher in Stromrichtung in einen Leiter hineingedreht, so gibt die Drehrichtung des Korkenziehers die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

1.2.2. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum

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?

Wir streuen bei dem Versuch nach Abb. 13 Eisenfeilspäne auf ein Stück Karton, das in den freien Raum der Spule hineinragt. Nach dem Einschalten des Stromes

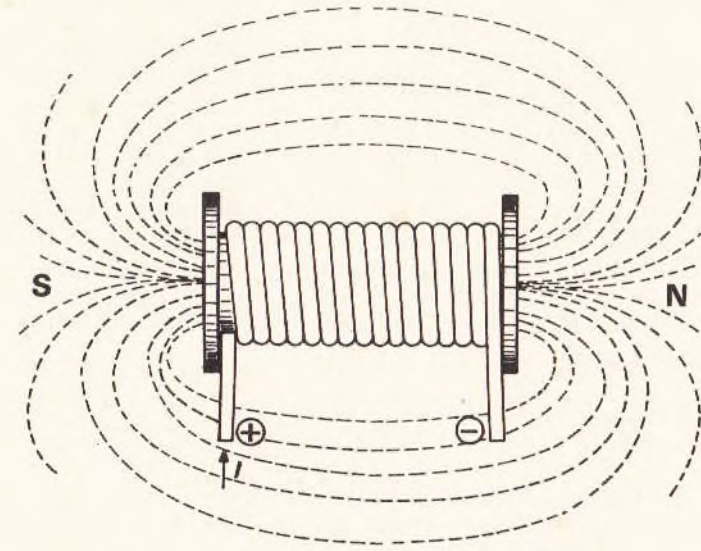
Demonstration des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule



= 4-6 V

(Abb. 13)

Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum



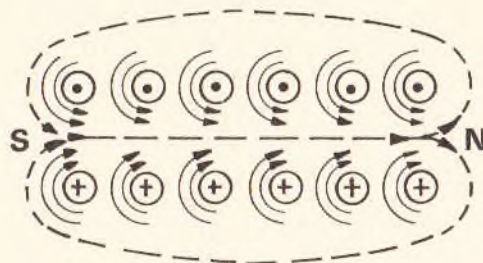
(Abb. 14)

erhalten wir ein magnetisches Feld nach dem Schema der Abb. 14. 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.

Beim Vergleich dieses Feldlinienbildes mit dem eines Stabmagneten stellt man eine Übereinstimmung der beiden Bilder fest (siehe Abb. 7).

1.2.2.1. Die Feldlinienrichtung um eine stromdurchflossene Spule mit Lufthohlraum

In Abb. 15 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. 12). Mit Hilfe der Stromrichtungsangabe können wir festlegen, in welcher Richtung die Feldlinien des zu jedem Leiterabschnitt gehörigen magnetischen Feldes verlaufen.



(Abb. 15)

Die Feldlinien der oberen Leiterquerschnittsflächen verlaufen links-herum, die der unteren rechtsherum. Im Innern der Spule verlaufen alle Feldlinien von links nach rechts. Wir erkennen, daß sich die Feldlinien der Magnetfelder der einzelnen Leiterabschnitte im Innern der Spule summieren zu einem Gesamtmagnetfeld der Spule, dessen Nord- und Südpol durch die Feldlinienrichtung der Einzelfelder gegeben ist. Zwei einfache Hilfsmittel zur Bestimmung der Richtung des Feldlinienverlaufs einer Spule sind:

- a) **Die Korkenzieher-Regel,**
die wir schon im Abschnitt 1.2.1.1. kennengelernt haben, oder
- b) **Die Rechte-Hand-Regel für den Magnetnordpol:**
Wird eine Spule mit der rechten Hand derart umfaßt, daß die Fingerspitzen in die Stromrichtung weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung der Feldlinien, den Nordpol, an.

1.2.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.2.

1. Wie reagiert eine Magnetnadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters?
2. Erläutern Sie anhand von Skizzen den Zusammenhang zwischen Stromrichtung und Feldlinienrichtung um den Leiter!
3. Wie lautet die Korkenzieherregel?
4. Leiten Sie anhand einer Skizze für eine stromdurchflossene Spule die Feldlinienrichtung des Spulenmagnetfeldes mit Hilfe der Korkenzieherregel ab!
5. Wie lautet die Rechte-Hand-Regel für den Magnetnordpol?

1.3. Was ist Magnetismus?

Anhand der Versuche mit Dauermagneten oder stromdurchflossenen Leitern und Spulen haben wir erkannt, daß in beiden Fällen mehr oder weniger ähnliche Erscheinungen nachzuweisen waren. Das wirft die Frage auf: Besteht zwischen den Ursachen für das magnetische Feld eines Dauermagneten und das eines Elektromagneten ein Unterschied? Nach den heutigen Erkenntnissen der Physik kann diese Frage verneint werden.

Danach gilt:

- a) Sobald sich eine elektrische Ladung bewegt (gerichtete Bewegung von Ladungsträgern = elektr. Strom), bildet sich ein magnetisches Feld aus,
- b) Bewegungsrichtung der Ladungsträger und Feldlinienrichtung stehen immer senkrecht zueinander,
- c) eine Umkehrung der Bewegungsrichtung hat eine Umkehrung der Feldlinienrichtung zur Folge.

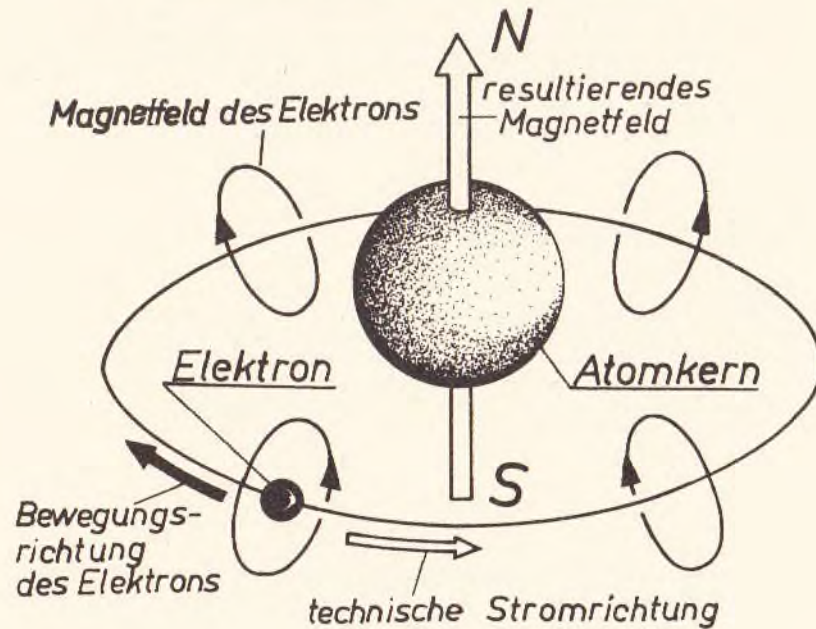
Die Verknüpfung zwischen elektrischem und magnetischem Feld wird als elektromagnetisches Feld bezeichnet (vergleiche: Elektromagnetische Wellen).

Diese Erkenntnisse lassen sich auch auf die Bewegung der Elektronen um den Atomkern anwenden:

Elektronen bewegen sich auf ihrer Schale mit hoher Geschwindigkeit um den Atomkern. Da es sich um die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern handelt, kann man den Vorgang als elektrischen Strom bezeichnen. Man spricht hier von Elementarströmen.

Um die Richtung des entstehenden magnetischen Feldes abzuleiten, müssen wir noch berücksichtigen, daß die technische Stromrichtung entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Elektronen verläuft. Mit Hilfe der Korkenzieherregel oder der Rechten-Hand-Regel für den Magnetnordpol läßt sich das durch die Elektronenbewegung erzeugte Magnetfeld nach Abb. 16 ableiten:

Elektronenbewegung und Magnetfeld im Atom



(Abb. 16)

Da die magnetischen Feldlinien oben aus- und unten eintreten, entsteht oben ein Nordpol und unten ein Südpol. In der Materie liegen nun auf kleinstem Raum sehr viele Atome nebeneinander. Jedes Atom (mit Ausnahme des Wasserstoffatoms) besitzt mehrere Elektronen, deren Bahnen alle gegeneinander räumlich versetzt sind. Betrachtet man eine Vielzahl benachbarter Atome, so stellt sich eine willkürliche Lage der Elektronenbahnen zueinander heraus. Als Folge daraus ergibt sich eine entsprechend willkürliche Lage der um die Elektronenbahnen entstehenden Magnetfelder. Ihre Wirkung hebt sich gegeneinander nach außen hin auf.

Erst wenn es gelingt, alle oder eine überwiegende Zahl benachbarter Elektronenbahnen in eine Ebene zu drehen, dann ergänzen sich die vielen kleinen Teilmagnetfelder zu einem nach außen hin wirksamen Gesamtmagnetfeld.

Der Ursprung des Magnetismus ist also im Atom zu suchen. Ursache dafür ist die gerichtete Bewegung der Elektronen auf ihrer Umlaufbahn um den Atomkern. Das erklärt auch die Untrennbarkeit der Magnete.

Die Ausrichtung der Elektronenbahnen gelingt je nach Art des Stoffes mehr oder weniger. Maßgebend dafür ist die Art der Bindung von Atomen innerhalb des Stoffes. Zudem unterscheiden wir Stoffe, bei denen die Ausrichtung bestehenbleibt, und Stoffe, bei denen die Elektronenbahnen nach Beendigung der äußeren Einwirkung sehr leicht in ihre willkürliche Lage zurückfallen. Wir werden diese Stoffeigenschaften noch in folgenden Abschnitten untersuchen.

Aus unseren Betrachtungen können wir zusammenfassen:

Magnetismus ist eine allgemeine Eigenschaft der Materie. Er tritt jedoch nur bei bestimmten Stoffen besonders stark nach außen hin in Erscheinung. Zu den Stoffen mit besonders stark ausgeprägten magnetischen Eigenschaften gehören z. B.

Eisen, Nickel und Kobalt.

Man nennt sie ferromagnetische¹⁾ Werkstoffe.

So ist z. B. Eisen im Vergleich zu nahezu unmagnetischen Werkstoffen bis zu einigen 100 000mal stärker magnetisierbar.

Unter einem Magnetfeld versteht man den Raum, in dem magnetische Wirkungen nachgewiesen werden können.

Innerhalb dieses Raumes gibt es an sich keine Konzentration der magnetischen Wirkungen auf bestimmte Feldlinien, ein Grund, weshalb die Feldlinien nur als Hilfsmittel zur Darstellung von Magnetfeldern dienen können.

Die durch Elektronenbewegung um den Atomkern entstandenen Magnetfelder bezeichnet man als Elementar- oder Molekularmagnete.

Die Erkenntnis, daß der Ursprung des Magnetismus im Atom selbst zu finden ist und die magnetischen Eigenschaften eines Stoffes von der Art der Atombindung in dem betreffenden Stoff abhängig sind, führte zur Entwicklung „künstlicher“ ferromagnetischer Werkstoffe. Diese haben überwiegend noch günstigere magnetische Eigenschaften als die lange bekannten Metalle Eisen, Nickel und Kobalt bzw. Legierungen dieser Metalle.

Zu den „künstlichen“ ferromagnetischen Werkstoffen gehören z. B. Ferroxcube, Ferroxidure und Siferrite. Sie bestehen aus chemischen Verbindungen von Eisenoxiden mit anderen Metalloxiden.

In diesem Zusammenhang dürfte auch interessant sein, daß ferromagnetische Werkstoffe ihre magnetischen Eigenschaften mit zunehmender Erwärmung verlieren. Das hängt mit der durch Erwärmung bedingten Gefügeveränderung zusammen. So kann man z. B. an Eisen bei einer Temperatur von 800 °C kaum noch magnetische Eigenschaften nachweisen.

1.3.1. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.3.

1. Wie kann man die Entstehung eines Magnetfeldes erklären? 2. In welcher Richtung stehen Stromrichtung (Ladungsträger-Bewegungsrichtung) und Feldlinienrichtung zueinander? 3. Erläutern Sie das durch Elektronenbewegung im Atom entstehende Magnetfeld! 4. Warum sind nur wenige Stoffe magnetisch, obgleich alle Stoffe in ihren Atomen sich bewegende Elektronen besitzen? 5. Welche natür-

¹⁾ ferrum (lateinisch) = Eisen

lichen Metalle gehören zu den magnetisierbaren Stoffen? 6. Was versteht man unter ferromagnetischen Stoffen? 7. Was versteht man schlechthin unter dem Begriff Magnetfeld? 8. Was sind künstliche ferromagnetische Werkstoffe? 9. Wie verhalten sich ferromagnetische Werkstoffe bei Erwärmung?

1.4. Eisen im Magnetfeld

Aufgrund unserer Kenntnisse über den Magnetismus können wir uns nun auch erklären, was vorgeht, wenn wir Eisen in ein Magnetfeld bringen.

In einem unmagnetisierten Eisenstück liegen die Molekularmagnete völlig willkürlich zueinander, etwa so, wie es in Abb. 17 dargestellt ist. Die Wirkung der einzelnen Molekularmagnete wird nach außen hin gegeneinander aufgehoben.

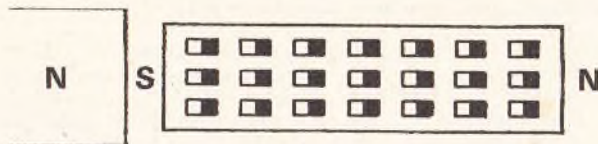
Ungeordnete Lage der Molekularmagnete



(Abb. 17)

Unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes – beispielsweise durch Bestreichen einer Stricknadel mit einem Magneten – werden die Molekularmagnete ausgerichtet. Das geschieht um so vollständiger, je stärker das äußere Magnetfeld ist. Liegen – wie in Abb. 18 – alle Molekularmagnete in der gleichen aufgezungenen Richtung, so ist eine weitere Steigerung der jetzt auftretenden magnetischen Wirkung trotz stärkeren Einflusses durch ein äußeres Magnetfeld nicht mehr möglich.

Lage der Molekularmagnete nach der Beeinflussung durch einen Dauermagneten

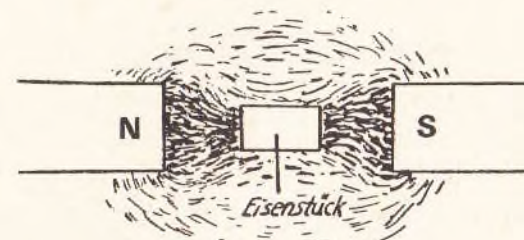


(Abb. 18)

Diesen Zustand bezeichnet man als Sättigung. Weiches Eisen verliert die magnetischen Eigenschaften sehr leicht, wenn der Einfluß eines äußeren Feldes wegfällt. Bei Stahl und anderen sogenannten hartmagnetischen oder dauermagnetischen Werkstoffen bleiben die Molekularmagnete in der einmal aufgezungenen Richtung liegen. Man spricht deshalb von Dauermagnetismus oder permanentem Magnetismus.

Wir wollen nun an einem einfachen Versuch ermitteln, welches Feldlinienbild sich ergibt, wenn sich ein Stück Eisen im Magnetfeld zwischen den Polen eines Dauermagneten befindet. Zu diesem Zweck bringen wir gemäß Abb. 19 ein Stück Eisen zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten, legen ein Stück Zeichenkarton darüber und bestreuen ihn mit Eisenfeilspänen und klopfen vorsichtig an den Karton.

Feldlinienbild nach dem Einbringen von Eisen in das Magnetfeld



(Abb. 19)

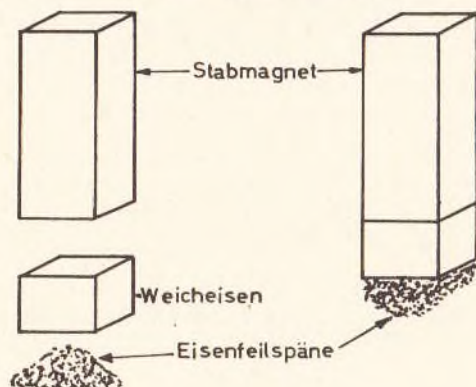
Dabei zeigt sich das in Abb. 19 dargestellte Feldlinienbild.

Man erkennt, daß die Feldlinien zum Eisenstück hin zusammengezogen sind. Der größte Teil der ursprünglich durch den Luftraum verlaufenden Feldlinien bevorzugt den Weg durch das Eisen. Das hängt damit zusammen, daß sich die Molekularmagnete im Eisen gut ausrichten lassen, in Luft dagegen so gut wie gar nicht. Die ausgerichteten Molekularmagnete erhöhen die magnetische Wirkung. Man spricht in diesem Zusammenhang von **magnetischer Durchlässigkeit** oder **Permeabilität** oder auch von magnetischer Leitfähigkeit. Wir kommen darauf in einem späteren Abschnitt nochmal zurück.

1.4.1. Die magnetische Influenz

Bei einem Versuch nach Abb. 20 halten wir zwischen ein Häufchen Eisenfeilspäne (oder Büroklammern) und einen Stabmagneten ein Weicheisenstück. Dabei geschieht zunächst nichts. Erst wenn wir den Stabmagneten dem Weicheisenstück so weit nähern, daß er es anzieht, werden auch die Eisenfeilspäne oder Büroklammern durch das Weicheisenstück angezogen.

Magnetische Influenz



(Abb. 20)

Trennen wir wieder den Stabmagneten vom Weicheisenstück, so fällt der größte Teil der Eisenfeilspäne oder Büroklammern zurück. Nur ein kleiner Teil bleibt nach wie vor haften. Die gleiche Erscheinung können wir beobachten, wenn wir den Stabmagneten umdrehen.

Die Molekularmagnete des Weicheisens sind durch den Stabmagneten ausgerichtet worden. Dadurch ist das Weicheisenstück selbst zu einem Magneten geworden und zeigt gleiche Eigenschaften wie ein Dauermagnet.

Diese Erscheinung bezeichnet man als **magnetische Influenz**.

Daß nicht sämtliche Eisenfeilspäne oder Büroklammern nach dem Entfernen des Stabmagneten zurückgefallen sind, ist darauf zurückzuführen, daß ein Teil der Molekularmagnete im Weicheisen ausgerichtet geblieben ist. Es ist also ein Rest Magnetismus zurückgeblieben: der sog. **Restmagnetismus** (auch **Remanenz**¹⁾ genannt).

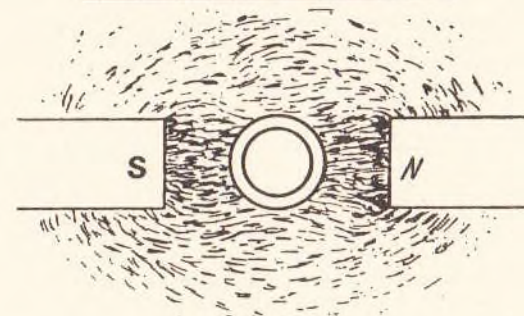
1.4.2. Die magnetische Abschirmung

Im folgenden Versuch soll das Feldlinienbild dargestellt werden, wenn sich ein Weicheisenring zwischen den Polen eines Dauermagneten befindet. Wir legen wieder über die Anordnung gemäß Abb. 21 ein Stück Karton und bestreuen ihn mit Eisenfeilspänen.

Das entstehende Feldlinienbild zeigt, daß die Feldlinien wie im Versuch nach Abb. 19 wieder zum größten Teil durch den Eisenring verlaufen. Hier ist jedoch interessant, daß der Raum innerhalb des Ringes völlig frei von Feldlinien bleibt.

¹⁾ remanere (lat.) = zurückbleiben

Schirmwirkung eines Eisenringes



(Abb. 21)

Der Eisenring hat gegen magnetische Felder eine abschirmende Wirkung.

Diese Tatsache macht man sich beim Aufbau gegen magnetische Felder empfindlicher Geräte zunutze.

So werden beispielsweise hochempfindliche Meßgeräte, deren Anzeige auf magnetischen Wirkungen beruht, durch einen Eisenmantel abgeschirmt. Ebenso werden Tonköpfe der Magnettongeräte oder Mikrofonübertrager mit einem Mantel aus Mu-Metall (magnetisch besonders gut leitfähige Eisenlegierung) gegen fremde Magnetfelder geschützt.

1.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.4.

1. Wie liegen die Molekularmagnete in unmagnetisiertem Eisen bzw. in Eisen, das unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes steht?
2. Welchen Einfluß hat ein Stück Eisen auf ein Magnetfeld?
3. Was versteht man unter magnetischer Leitfähigkeit?
4. Erläutern Sie den Vorgang und den Begriff magnetischer Influenz!
5. Was ist Remanenz?
6. Wieso zeigt beispielsweise ein Eisenring eine abschirmende Wirkung des Innenraumes gegen Magnetfelder?
7. Wo nutzt man die abschirmende Wirkung des Eisens aus?

1.5. Die Größen des magnetischen Feldes¹⁾

In den folgenden Abschnitten sollen die physikalischen Größen des magnetischen Feldes und deren Einheiten behandelt werden. Erst mit der Festlegung bestimmter Größen und Einheiten werden physikalische Vorgänge meßbar und damit vergleichbar.

¹⁾ Über physikalische Einheiten siehe Seite 140 dieses Bandes.

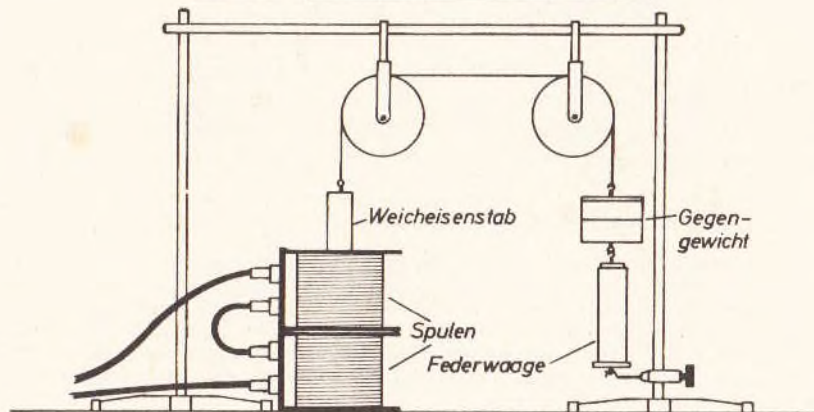
Was liegt näher, als zunächst einmal zu untersuchen, wovon überhaupt die Stärke eines Magnetfeldes abhängig ist. Die Stärke eines Magnetfeldes kann man z.B. an der Kraftwirkung messen, mit der Eisen angezogen wird, oder man mißt sie anhand der Auslenkung eines Elektronenstrahls, der durch eine Kathodenstrahlröhre fließt. Der Elektronenstrahl bringt einen Leuchtschirm dort zum Aufleuchten, wo er auftrifft (vgl. mit der Bildröhre eines Fernsehgeräts).

In den folgenden Versuchen zur Festlegung der magnetischen Durchflutung und der magnetischen Feldstärke wird eine solche Kathodenstrahlröhre verwendet. Dabei ist die Höhe des Leuchtstrichs ein Maß für die Kraft, mit der das magnetische Feld einer oder mehrerer Spulen den Elektronenstrahl in der Senkrechten auslenkt.

Bei einigen für Demonstrationszwecke entwickelten Oszilloskopen ist eine magnetische Ablenkung des Elektronenstrahls mit Hilfe von Ferritstäben möglich. Die Ferritstäbe können in zwei seitlich am Gehäuse angebrachte Kunststoffrohre eingeschoben werden. Auf die Ferritstäbe – die in Form von Antennen-Ferritstäben für Rundfunkgeräte handelsüblich sind – werden die Ablenkspulen außerhalb des Gehäuses gesteckt.

Sollten die betreffenden Geräte nicht zur Verfügung stehen, so kann man die Versuche auch gemäß Abb. 22 durchführen: Man stellt die verwendeten Spulen senkrecht und läßt von oben in den Spulenhohlraum einen Weicheisenstab hineinragen. Das Gewicht des Weicheisenstabs wird durch ein Gegengewicht genau ausgeglichen.

Nachweis der Stärke eines Magnetfeldes



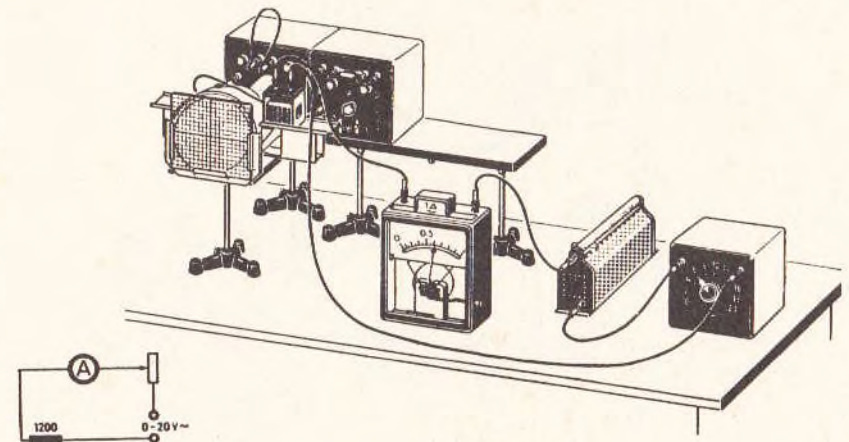
(Abb. 22)

Die Auslenkung der unterhalb des Gegengewichts angebrachten Federwaage ist dann ein Maß für die Kraft, mit der der Eisenstab in die Spulen hineingezogen wird. Die Versuchsanordnung erhebt jedoch keinen Anspruch auf Genauigkeit.

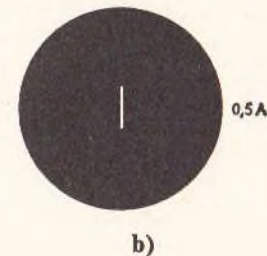
1.5.1. Die magnetische Durchflutung Θ

Bei dem Versuch nach Abb. 23a 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. 23b; bei Erhöhung der Stromstärke auf 1 A hat sich die Höhe des Leuchtstriches verdoppelt (Abb. 23c).

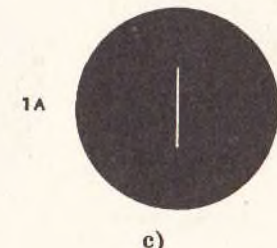
Die Stärke des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule mit Luft-hohlraum in Abhängigkeit von der Stromstärke



a)



b)



c)

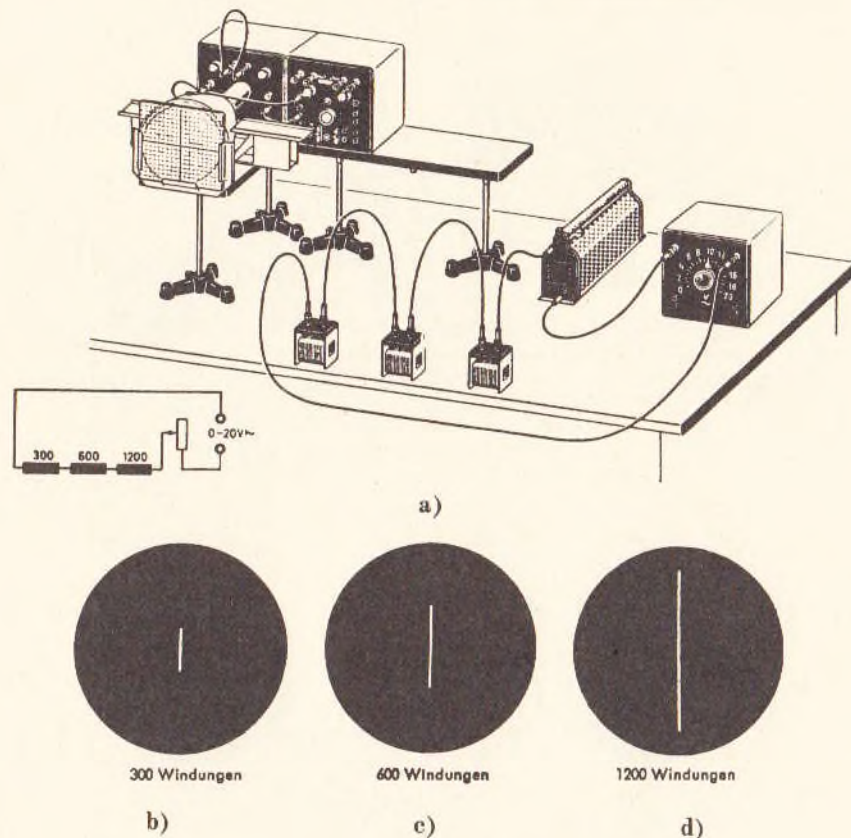
(Abb. 23)

Wir erkennen:

Die Wirkung des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule wächst mit der Stromstärke.

Bei dem Versuch nach Abb. 24 fließt durch drei hintereinandergeschaltete 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. 24b bis d.

Die Stärke des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule mit Luft-hohlraum in Abhängigkeit von der Windungszahl



(Abb. 24)

Wir erkennen:

Die Wirkung des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule wächst mit der Windungszahl.

Anhand der Versuche nach den Abb. 23 und 24 haben wir erkannt, daß die Stärke des Magnetfeldes oder auch die magnetische Kraft einer Spule mit der Stromstärke (I) und der Windungszahl (N) zunimmt.

Das Produkt aus Stromstärke (in Ampere) und Windungszahl wird als Durchflutung bezeichnet. Als Formelzeichen wird dafür der griechische Buchstabe Theta gesetzt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
magnetische Durchflutung	Θ	A (Ampere)

Als Einheit für Θ gilt Ampere, da die Windungszahl eine Zählgröße (mit der Einheit 1) ist. Vor allem in der Relais-technik spricht man jedoch für Θ auch von der Amperewindungszahl.

Formelmäßig ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Theta = I \cdot N \quad \text{A}$$

Θ in Ampere und I in Ampere.

Da die Durchflutung Ursache für das Magnetfeld ist, kann man sie auch als „magnetische Spannung“ bezeichnen. (Vergleiche: Die elektrische Spannung ist Ursache für das elektrische Feld bzw. den elektrischen Strom).

Beispiel: Ein Relais mit 2500 Windungen wird von einem Strom der Stärke 80 mA durchflossen.

Wie groß ist die magnetische Durchflutung?

Gegeben: $N = 2500$; $I = 80 \text{ mA} = 0,08 \text{ A}$

Gesucht: Θ

Lösung: $\Theta = I \cdot N$
 $= 0,08 \text{ A} \cdot 2500$
 $\Theta = \underline{\underline{200 \text{ A}}}$

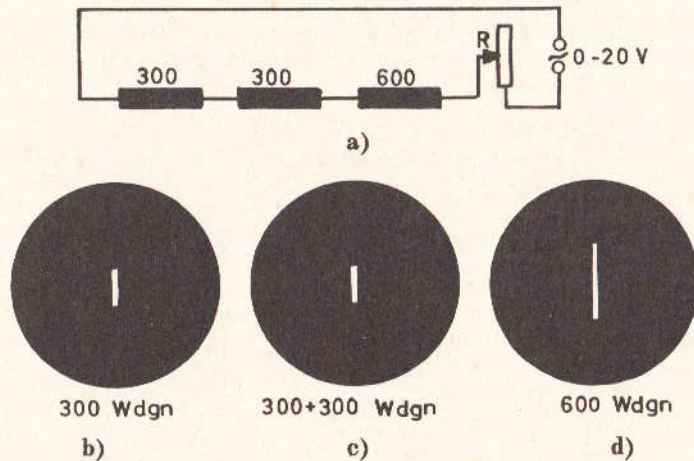
Die Durchflutung beträgt 200 Ampere(windungen).

1.5.2. Die magnetische Feldstärke H

Im folgenden Versuch soll gezeigt werden, daß die Wirkung des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule auch von ihren Abmessungen – vor allem ihrer Länge – abhängt.

Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie in Abb. 24; hier wollen wir jedoch zwei Spulen zu je 300 Wdgn mit einer Spule vergleichen, die 600 Wdgn hat (Schema des Versuchs in Abb. 25a). Die Spulenkörper aller drei Spulen haben gleiche Abmessungen. Zu Beginn des Versuchs wird eine Spule mit 300 Wdgn verwendet, wobei der Lichtstrich auf eine bestimmte Höhe eingeregelt wird (Abb. 25b). 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 Lichtstriches verändert sich kaum (Abb. 25c). Bei der Untersuchung der Spule mit 600 Wdgn zeigt der Lichtstrich die doppelte Höhe gegenüber dem Versuch mit den zwei Spulen zu je 300 Wdgn (Abb. 25d). Bei einer Spule mit 1200 Wdgn würde der Lichtstrich viertel so hoch sein wie bei einer Spule mit 300 Wdgn.

Die Stärke des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum in Abhängigkeit von der Spulenlänge



(Abb. 25)

Wir erkennen:

Die Wirkung des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum ist um so größer, je kürzer die Spule bei gleicher Stromstärke und gleicher Windungszahl ist.

Dieser Einfluß wird bei der magnetischen Feldstärke H berücksichtigt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
magnetische Feldstärke	H	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$ (MKSA-System)
	oder	$\frac{\text{A}}{\text{cm}}$ (techn. Maßsystem)

In eine Formel gebracht ergibt sich:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Theta}{l} \quad \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ oder } \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

Dafür gilt:

- a) I in Ampere (N : Einheit 1)
 l in Meter
 H in Ampere pro Meter

oder

- b) I in Ampere (N : Einheit 1)
 l in Zentimeter
 H in Ampere pro Zentimeter

Es sei schon hier darauf hingewiesen, daß für l bei Spulen mit Lufthohlraum die Spulenlänge, bei Spulen mit Eisenkern die mittlere Eisenweglänge (= mittlere Feldlinienlänge) einzusetzen ist.

1. Beispiel: Eine Spule mit Lufthohlraum besitzt 1200 Windungen. Die Länge des Spulenkörpers beträgt 8 cm.

Wie groß ist die magnetische Feldstärke H , wenn die Spule von einem Strom der Stärke 1,5 A durchflossen wird?

Gegeben: $N = 1200$; $l = 8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m}$; $I = 1,5 \text{ A}$

Gesucht: H

Lösung: $H = \frac{I \cdot N}{l}$

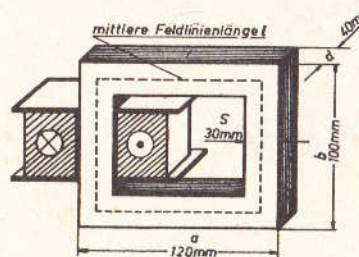
$$H = \frac{1,5 \text{ A} \cdot 1200}{0,08 \text{ m}} = 22500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

oder

$$H = \frac{1,5 \text{ A} \cdot 1200}{8 \text{ cm}} = 225 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

Die magnetische Feldstärke beträgt 22500 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$ oder 225 $\frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

2. Beispiel: Auf einem geschlossenen Eisenkern (legiertes Blech) nach nebenstehender Zeichnung befindet sich eine Spule mit 600 Windungen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke H , wenn die Spule von einem Strom der Stärke 0,2 Ampere durchflossen wird?



(Abb. 26)

Gegeben: $N = 600$; $I = 0,2 \text{ A}$; Maße des Eisenkerns: $a = 120 \text{ mm}$;
 $b = 100 \text{ mm}$;
 $s = 30 \text{ mm}$

Gesucht: H

Lösung: $H = \frac{I \cdot N}{l}$

Mittlere Feldlinienlänge l :

$$\begin{aligned} l &= 2 \cdot (a-s) + 2 \cdot (b-s) \\ &= 2 \cdot (12 \text{ cm} - 3 \text{ cm}) + 2 \cdot (10 \text{ cm} - 3 \text{ cm}) \\ l &= 18 \text{ cm} + 14 \text{ cm} = \underline{\underline{32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}}} \end{aligned}$$

$$H = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 600}{0,32 \text{ m}} = \underline{\underline{375 \frac{\text{A}}{\text{m}}}}$$

oder

$$H = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 600}{32 \text{ cm}} = \underline{\underline{3,75 \frac{\text{A}}{\text{cm}}}}$$

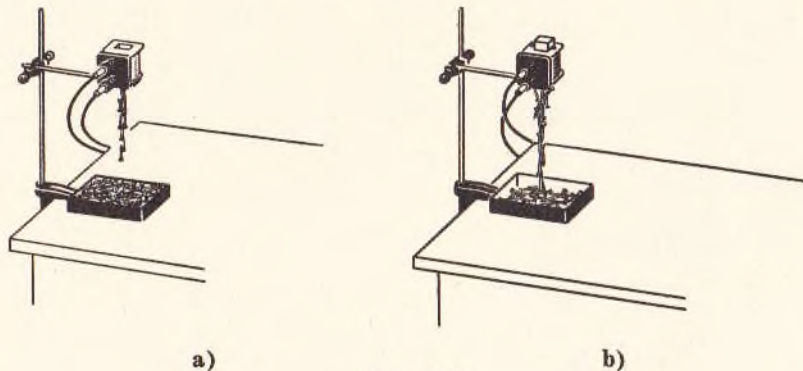
Die Feldstärke beträgt $375 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bzw. $3,75 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

1.5.3. Die magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität) μ

Wir haben an einfachen Versuchen im Abschnitt 1.4. bereits erkannt, daß z. B. Eisen eine bessere magnetische Leitfähigkeit besitzt als Luft und infolgedessen das Magnetfeld im Eisen stark konzentriert wurde. Demnach muß das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule eine stärkere Wirkung zeigen, wenn man in das Innere der Spule einen Eisenkern hineinbringt. Zum Beweis machen wir wieder einen einfachen Versuch:

Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule

a) ohne und b) mit Eisenkern



(Abb. 27)

Nach Abb. 27 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 Stromzufflusses fallen alle Nägel wieder zurück. Nach Abb. 27 bringen wir jetzt in das Spuleninnere 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.

Die Erklärung für den Versuch ist für uns nicht mehr schwierig: Im Eisen lassen sich erheblich mehr Molekularmagnete ausrichten – und damit die magnetische Wirkung erhöhen – als in der Luft. Sind alle Molekularmagnete des Eisenkerns ausgerichtet, ist eine weitere Steigerung nicht möglich. Diese Tatsache führt dazu, daß die Leitfähigkeit des Kerns schlechter wird, je stärker dieser vormagnetisiert ist.

Die magnetische Leitfähigkeit ist eine Materialkonstante. Sie gibt an, wieviel mal besser das betreffende Kernmaterial magnetisch leitfähig ist als der luftleere Raum. Man bezeichnet diese Materialkonstante daher als **relative Permeabilität**.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
relative magnetische Leitfähigkeit oder Permeabilität	μ_r	1

Die relative Permeabilität als Materialkonstante ist eine reine Vergleichs- oder Verhältniszahl und hat daher die Einheit 1.

Sie ist aber – wie wir bereits festgestellt haben – keine für das Material absolut feststehende Größe, sondern hängt wesentlich vom Grad der Magnetisierung (Ausrichtung der Molekularmagnete) ab. Um den Einfluß eines bestimmten Kernmaterials für eine stromdurchflossene Spule auf ihr Magnetfeld zu untersuchen, muß man ein Diagramm aufnehmen, das den Grad der Vormagnetisierung berücksichtigt. Dieses Diagramm werden wir noch als Hysteresis kennenlernen.

Für Luft kann dagegen $\mu_r = 1 = \text{konstant}$ gesetzt werden.

Für den luftleeren Raum (Vacuum) setzt man die sog. Induktionskonstante oder absolute Permeabilität μ_0 .

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Induktionskonstante oder absolute Permeabilität	μ_0	$\frac{Vs}{Am}$ oder $\frac{Vs}{Acm}$

μ_0 hat den Wert $1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$ oder $1,257 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{Acm}$.

Die Gesamtpermeabilität μ ergibt sich aus dem Produkt

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

1.5.4. Die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion B

Nachdem wir die Größen untersucht und festgelegt haben, die einen Einfluß auf die Wirkung des Magnetfeldes haben, wollen wir jetzt die Größe bestimmen, die die Wirkung selbst kennzeichnet.

Da Vorgänge, die auf die Wirkung magnetischer Felder zurückzuführen sind, erst in späteren Abschnitten behandelt werden (Erzeugen von Induktionsspannungen oder die Ablenkung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld), wollen wir zunächst zur Veranschaulichung auf das Bild von der magnetischen Feldlinie zurückgreifen.

Dafür gilt:

a) nach dem MKSA-System: $\frac{100\,000\,000 \text{ Feldlinien}}{1 \text{ m}^2} = \text{Tesla}^{1)} (\text{T})$

b) nach dem CGS-System: $\frac{1 \text{ Feldlinie}}{1 \text{ cm}^2} = 1 \text{ Gauß}^{2)} (\text{G})$

Zwischen den beiden Einheiten besteht folgende Beziehung:

$1 \text{ Tesla} = 10\,000 \text{ Gauß} = 10^4 \text{ G}$
$1 \text{ Gauß} = \frac{1}{10\,000} \text{ Tesla} = 10^{-4} \text{ T.}$

Begriff	Formelzeichen	Einheit
magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion	B	T (Tesla) bzw. G (Gauß)

Es sei hier aber nochmals darauf hingewiesen, daß die magnetische Feldlinie nur ein Hilfsmittel zur Darstellung oder Veranschaulichung des Magnetfeldes ist.

Um die Größe B anhand der Wirkungen eines Magnetfeldes abzuleiten, kann man wie folgt vorgehen, wobei auf spätere Abschnitte vorgegriffen werden muß³⁾. Man kann die Kraft messen, die in einem Magnetfeld auf einen Leiter bestimmter wirk-samer Länge⁴⁾ wirkt, wenn er von einem Strom bestimmter Stärke durchflossen

¹⁾ Tesla = kroatischer Physiker, 1856–1943

²⁾ Gauß = deutscher Physiker, 1777–1855

³⁾ Es empfiehlt sich, diese Ableitung später im Zusammenhang mit den betr. Stoff-gebieten zu wiederholen.

⁴⁾ wirksame Länge = die Länge, die sich innerhalb des Magnetfeldes befindet.

wird. Wegen der einfacheren Umrechnung mechanischer in elektrische Größen mißt man die Kraft in der MKSA-Einheit N (= Newton). Dabei ist $1 \text{ N} = 0,102 \text{ kp}$ bzw. $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$. Wählen wir jetzt einen Leiter von 1 m wirksamer Länge, der von einem Strom der Stärke 1 A durchflossen wird. Wirkt auf diesen Leiter im Magnetfeld eine Kraft von 1 N , dann hat das Magnetfeld die magnetische Induktion 1 Tesla .

Als Formel geschrieben:

Größengleichung	Einheitengleichung
$B = \frac{F}{l \cdot I}$	$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m}} = \frac{\text{Nm}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{Ws}}{1 \text{ Am}^2} = \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{Am}^2} = \frac{1 \text{ Vs}}{\text{m}^2}$

Dafür sind folgende Beziehungen anzuwenden:

$1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$ (Wattsekunde)

$1 \text{ Ws} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$ (Volt $\times$ Ampere $\times$ Sekunde)

Man kann aber auch die Höhe der Induktionsspannung messen, die in einem Leiter erzeugt wird, der mit einer bestimmten wirksamen Länge und einer bestimmten Geschwindigkeit senkrecht zu den Feldlinien durch ein Magnetfeld bewegt wird (wobei für den Leiter eine Flußänderung eintreten muß). Wenn wir auch hierfür wieder die Grundeinheiten wählen, nämlich 1 m wirksame Leiterlänge, $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Geschwindigkeit und 1 V Induktionsspannung, so muß das Magnetfeld die magnetische Induktion 1 Tesla haben.

Größengleichung	Einheitengleichung
$B = \frac{U}{l \cdot v}$	$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$

Nach beiden Ableitungen erhalten wir also für

$$1 \text{ Tesla} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$$

Aufgrund der Beziehung $1 \text{ Gauß} = 10^{-4} \text{ Tesla}$ ergibt sich für

$$1 \text{ Gauß} = 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Diese abgeleiteten Einheiten lassen die Berechnung elektrischer Größen aus magnetischen Größen zu. Sie gehören zum praktischen Maßsystem.

Da wir ermittelt haben, welche Größen einen Einfluß auf die magnetische Induktion haben, können wir den Zusammenhang als Formel schreiben:

$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$	T bzw. G
---------------------------------	----------

Wegen des schwierigen Arbeitens mit den praktischen Einheiten für μ_0 kann vereinfacht gesagt werden:

Nach der obigen Formel ergibt sich

$$B \text{ in Tesla, wenn für } \mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ und } H \text{ in } \frac{\text{A}}{\text{m}},$$

$$B \text{ in Gauß, wenn für } \mu_0 = 1,257 \text{ und } H \text{ in } \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

eingesetzt wird.

Hinweis:

Die oben abgeleitete Formel zur Berechnung der magnetischen Induktion B läßt sich in dieser Form nur anwenden, wenn μ_r als Konstante (z. B. für Luft: $\mu_r = 1$) anzusehen ist. Da die relative Permeabilität bei ferromagnetischen Stoffen vom Grad der Magnetisierung (Vormagnetisierung) abhängt, muß der Zusammenhang zwischen Ursache (H) und Wirkung (B) den jeweiligen Magnetisierungskurven entnommen werden. Berechnungsbeispiele für Spulen mit Eisenkern werden daher erst im Abschnitt 1.6. gebracht.

Beispiel: Welche magnetische Flußdichte B ergibt sich für eine Spule mit Lufthohlraum mit 1800 Windungen, deren Spulenkörper 6 cm lang ist, wenn sie von einem Strom der Stärke 0,8 A durchflossen wird?

Gegeben: $N = 1800$; $I = 0,8 \text{ A}$; $l = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$; $\mu_r = 1$ (Luft)

Gesucht: B

Lösung: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

$$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{0,8 \text{ A} \cdot 1800}{0,06 \text{ m}} = 24000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

oder

$$H = \frac{0,8 \text{ A} \cdot 1800}{6 \text{ cm}} = 240 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$B = 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 24000 \text{ T}$$

$$B = 31400 \cdot 10^{-6} \text{ T} = \underline{\underline{0,0314 \text{ T}}}$$

oder

$$B = 1,257 \cdot 1 \cdot 240 \text{ G} = \underline{\underline{314 \text{ G}}}$$

Die magnetische Flußdichte beträgt 0,0314 Tesla bzw. 314 Gauß.

1.5.5. Der magnetische Fluß Φ

Unter dem magnetischen Fluß versteht man die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien, die in einer Polfläche wirksam ist. Um den magnetischen Fluß zu bestimmen, braucht man also nur die magnetische Flußdichte (bzw. magnetische Induktion) B mit der Polfläche zu multiplizieren.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
magnetischer Fluß	Φ	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Wb (Weber)} \\ \text{oder M (Maxwell)} \end{array} \right.$

Als Formel ergibt sich:

$$\Phi = B \cdot A \quad \begin{array}{l} \text{Wb (Weber)}^1) \\ \text{oder M (Maxwell)}^2) \end{array}$$

Φ ergibt sich aus der Formel in

Weber, wenn B in Tesla und A in m^2 und in

Maxwell, wenn B in Gauß und A in cm^2 eingesetzt wird.

Mit Hilfe einer Einheitengleichung erhält man folgendes Ergebnis:

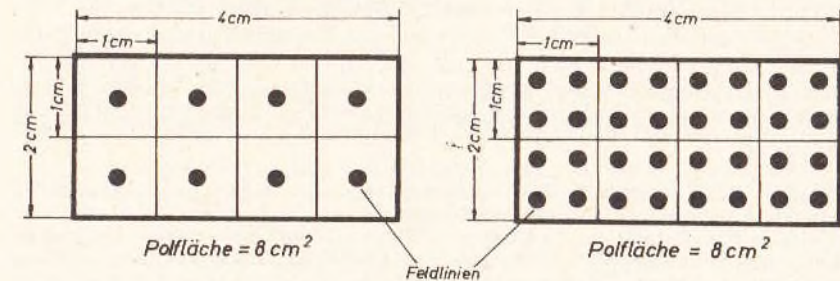
$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 10^8 \text{ Feldlinien}$$

$$1 \text{ M} = 10^{-8} \text{ Vs} = 1 \text{ Feldlinie}$$

$$\text{d. h. } 1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ M oder } 1 \text{ M} = 10^{-8} \text{ Wb.}$$

Der Zusammenhang zwischen B und Φ soll durch folgende Darstellungen veranschaulicht werden:

Der Zusammenhang zwischen den Größen B und Φ



$$\begin{aligned} B &= 1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} \\ \Phi &= 8 \text{ M} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= 4 \text{ G} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ T} \\ \Phi &= 32 \text{ M} = 32 \cdot 10^{-8} \text{ Wb} \end{aligned}$$

(Abb. 28)

¹⁾ Weber = deutscher Physiker, 1804–1891.

²⁾ Maxwell = englischer Physiker, 1831–1879.

1.5.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.5.

1. Von welchen Größen hängt die magnetische Durchflutung Θ ab? 2. In welcher Einheit wird die Durchflutung gemessen? 3. Welchen Einfluß hat die Länge einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum auf die Stärke ihres Magnetfeldes? 4. Geben Sie die Formel zur Berechnung der magnetischen Feldstärke an! 5. In welchen Einheiten wird die magnetische Feldstärke (MKSA bzw. techn.) angegeben? 6. Welche Länge ist in die Formel zur Berechnung der magnetischen Feldstärke für eine Spule mit Lufthohlraum bzw. mit Eisenkern einzusetzen? 7. Was versteht man unter der relativen Permeabilität μ_r ? 8. Warum ist die relative Permeabilität für ferromagnetische Werkstoffe keine absolut feststehende, konstante Größe? 9. Wie groß ist die relative Permeabilität für Luft? 10. Welchen Wert (Betrag) und welche Einheit hat die Induktionskonstante μ_0 ? 11. Welche Größe kennzeichnet die Wirkung eines Magnetfeldes? 12. Erläutern Sie mit Hilfe der Feldliniendichte die Einheiten Tesla und Gauß für die magnetische Induktion B ! 13. Welche abgeleitete Einheit kann man für 1 Tesla setzen? 14. Aus welchem formelmäßigen Zusammenhang läßt sich die magnetische Induktion B aus den Eigenschaften einer Spule und ihres Kerns bestimmen? 15. Was versteht man unter dem magnetischen Fluß Φ ? 16. In welchen Einheiten wird Φ gemessen?

1.6. Hystereseschleife und Magnetisierungskurve

1.6.1. Die Hystereseschleife

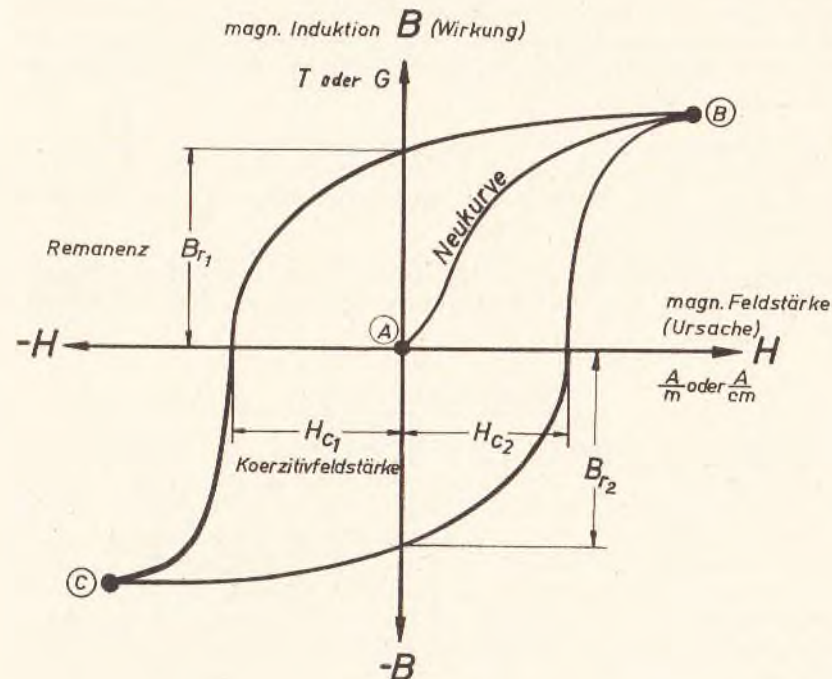
Aufgrund der Tatsache, daß ferromagnetische Werkstoffe einen großen verstärkenden Einfluß auf das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule haben, werden nahezu alle auf elektromagnetischer Wirkung beruhenden Bauteile mit Kernen aus ferromagnetischen Stoffen versehen.

Jetzt soll anhand eines Diagramms untersucht werden, wie sich die magnetische Induktion im schmalen Luftspalt eines Eisenkerns verändert, wenn die Stromstärke in der auf den Eisenkern gewickelten Spule gleichmäßig geändert wird. Da mit einer Spule bestimmter Windungszahl und einem Eisenkern bestimmter Ausmaße gearbeitet wird, ändert sich mit der Stromstärke verhältnismäßig auch die magnetische Feldstärke H .

Wird ein völlig unmagnetischer Eisenkern verwendet, so steigt die magnetische Induktion zunächst mit wachsender Stromstärke (bzw. magn. Feldstärke) stark an. Die Molekularmagnete im Eisenkern werden nach und nach in eine bestimmte Richtung gezwungen. Wird die Stromstärke (bzw. magn. Feldstärke) immer weiter gesteigert, so nimmt die magnetische Induktion schließlich immer weniger zu – nahezu alle Molekularmagnete sind ausgerichtet. Eine weitere Erhöhung der Stromstärke würde kaum noch ein Ansteigen der magnetischen Induktion bewirken. Diesen Zustand bezeichnet man als Sättigung (Punkt B in Abb. 29).

Die bis jetzt aufgezeichnete Kurve für die Magnetisierung von völlig unmagnetischem Eisen (Punkt A bis B) nennt man auch **Neukurve**. Wird die Stromstärke (magn. Feldstärke) wieder bis Null verringert, dann wird nicht etwa auch die magnetische Induktion Null. Es bleibt vielmehr eine bestimmte magnetische Induktion B_{r1} bestehen, die wir schon als **Remanenz** oder **Restmagnetismus** kennengelernt haben. Um die Remanenz zu beseitigen, muß man die Stromrichtung in der

Hystereseschleife



(Abb. 29)

Spule umkehren (negative magn. Feldstärke). Erst wenn die Stromstärke (magn. Feldstärke) in umgekehrter Richtung bis zu einem bestimmten Betrag gesteigert wird, ist keine Remanenz mehr vorhanden, die magnetische Induktion also Null.

Um die Remanenz im Eisenkern zu beseitigen, mußte eine bestimmte magnetische Feldstärke entgegengesetzt zur ursprünglichen Richtung aufgewendet werden. Dieser Betrag der magnetischen Feldstärke wird als **Koerzitivfeldstärke¹⁾** (auch Koerzitivkraft) H_{c1} bezeichnet. Sie dient als wesentliches Merkmal zur Beurteilung des magnetischen Verhaltens eines ferromagnetischen Werkstoffes.

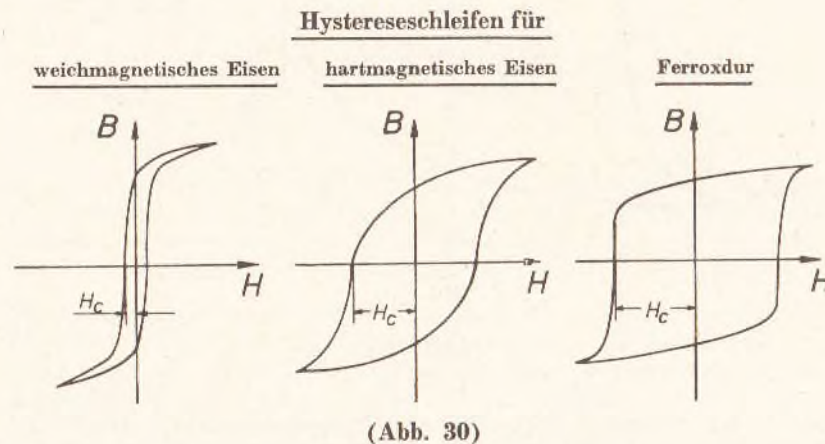
Bei weiterer Erhöhung der Stromstärke (magn. Feldstärke) in negativer Richtung wird eine jetzt ebenfalls in umgekehrter Richtung wachsende magnetische Induktion hervorgerufen – bis zur negativen Sättigung (Punkt C). Beim Verringern der Stromstärke bis Null bleibt eine entsprechend negative Remanenz B_{r2} erhalten. Um diese aufzuheben, muß die Stromrichtung wieder positiv gemacht und die magnetische Feldstärke in der Spule bis zu einem bestimmten Betrag gesteigert werden (Koerzitivfeldstärke H_{c2}). Eine weitere Steigerung führt schließlich wieder zur Sättigung (Punkt B).

¹⁾ coercere (lat.) = zügeln

Würde die Spule von einem Wechselstrom durchflossen, so würde die magnetische Induktion der äußeren Kurve folgen. Diese Kurve bezeichnet man als Hystereseschleife. Sie zeigt deutlich, daß zwischen der Ursache (= magnetische Feldstärke H) und der Wirkung (= magnetische Induktion B) bei ferromagnetischen Werkstoffen kein linearer Zusammenhang besteht.

Um das magnetische Verhalten eines ferromagnetischen Werkstoffes in einem wechselnden Magnetfeld größtmäßig zu bestimmen, muß man daher immer auf die für den betreffenden Werkstoff aufgenommene Hystereseschleife zurückgreifen.

Interessant ist der Vergleich zwischen den Hystereseschleifen für weichmagnetische und hartmagnetische (dauer magnetische) Werkstoffe (Abb. 30).



Die Bilder veranschaulichen den wesentlichen Unterschied zwischen weich- und hartmagnetischen Werkstoffen, **zurückzuführen auf die Koerzitivfeldstärke**. Künstliche Dauermagnetwerkstoffe, wie z. B. Ferroxdur, zeigen eine nahezu ideale Hystereseschleife. Bei ihnen ist nur ein geringes Überschreiten der Koerzitivfeldstärke notwendig, um sie sehr stark zu magnetisieren. Andererseits ist die Koerzitivfeldstärke sehr groß, so daß eine Beseitigung der Remanenz durch Fremdfelder kaum zu erwarten ist (sehr dauerhafte Magnete).

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch eine sehr geringe, hart- oder dauer magnetische Werkstoffe durch eine große Koerzitivfeldstärke aus.

Im Zusammenhang mit der Hystereseschleife dürfte interessant sein, daß man aus dem Flächeninhalt einer Hystereseschleife für den betreffenden ferromagnetischen Werkstoff die bei Anwendung in Wechselfeldern entstehenden Ummagnetisierungsverluste (Ummagnetisierungsarbeit) bestimmen kann. Denkt man sich eine Hystereseschleife als Rechteck, so kann man ihren Flächeninhalt als Produkt aus Breite mal Höhe errechnen. Setzen wir die entsprechenden Einheiten für die Breite und Höhe einer Hystereseschleife in das Produkt, so erhalten wir

$$\text{Fläche} = \text{Breite} \cdot \text{Höhe}$$

$$= \frac{\text{A}}{\text{cm}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3}$$

Der Flächeninhalt der Hystereseschleife ist also ein Maß für die Ummagnetisierungsverluste in Ws (Wattsekunden) je cm^3 des betreffenden ferromagnetischen Werkstoffes.

1.6.2. Magnetisierungskurven

Für Ummagnetisierungsvorgänge – vor allem für die Anwendung bei Wechselstrom – werden nur weichmagnetische Werkstoffe verwendet. Da deren Hystereseschleifen aber sehr schmal sind, kann man zur Vereinfachung bei der Berechnung der magnetischen Eigenschaften – ohne große Fehler zu machen – auf eine mittlere Kurve zurückgreifen. Ebenso kann man auf den Kurvenverlauf für negative magnetische Feldstärke verzichten, da er spiegelbildlich zum Verlauf für positive magnetische Feldstärke liegt. Solche vereinfachten Diagramme nennt man **Magnetisierungskurven**. Sie entsprechen in etwa den Neukurven.

In Abb. 31 sind Magnetisierungskurven für einige gebräuchliche Eisensorten dargestellt. Sie dienen auch als Grundlage für die Übungsbeispiele.

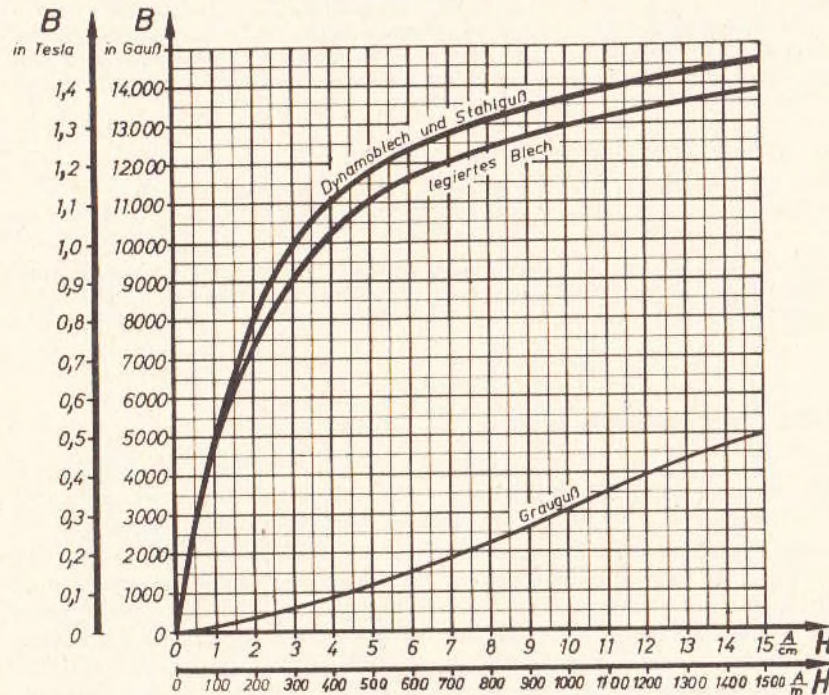
Anhand der Magnetisierungskurven läßt sich auch die relative Permeabilität für den bestimmten Magnetisierungszustand einer Eisensorte bestimmen. Dazu brauchen wir nur die bereits abgeleitete Formel

$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ nach μ_r umzustellen. Die Umstellung ergibt

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

Errechnet man für eine Eisensorte μ_r bei verschiedenem Grad der Magnetisierung, dann ergibt sich, daß μ_r mit zunehmender Magnetisierung kleiner wird. Deshalb hat μ_r für einen bestimmten ferromagnetischen Stoff keinen konstanten, festen Wert.

Magnetisierungskurven



(Abb. 31)

Hinweis für Berechnungsbeispiele:

Bei der Bestimmung magnetischer Größen sind jeweils folgende Einheiten aneinander anzupassen:

MKSA-System:

$$B \text{ in Tesla} - \Phi \text{ in Weber} - H \text{ in } \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

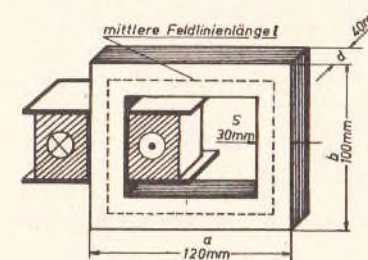
$$l \text{ in m} - A \text{ in m}^2 - (F \text{ in Newton}),$$

Technisches oder praktisches Maßsystem:

$$B \text{ in Gauß} - \Phi \text{ in Maxwell} - H \text{ in } \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$l \text{ in cm} - A \text{ in cm}^2 - (F \text{ in kp}).$$

Beispiel 1: Auf dem geschlossenen Eisenkern aus legiertem Blech nach nebenstehender Zeichnung befindet sich eine Spule mit 800 Windungen. Sie wird von einem Strom der Stärke 0,2 A durchflossen.



(Abb. 32)

Wie groß sind magnetische Induktion und magnetischer Fluß?

Gegeben: $N = 800$; $I = 0,2 \text{ A}$; Maße des Kerns: $a = 120 \text{ mm}$,
 $b = 100 \text{ mm}$,
 $s = 30 \text{ mm}$,
 $d = 40 \text{ mm}$;

Eisensorte: legiertes Blech.

Gesucht: B ; Φ

Lösung: a) B ergibt sich aus der Magnetisierungskurve der betreffenden Eisensorte für einen bestimmten Wert H .

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

mittlere Feldlinienlänge l :

$$l = 2 \cdot (a - s) + 2 \cdot (b - s)$$

$$= 2 \cdot (12 \text{ cm} - 3 \text{ cm}) + 2 \cdot (10 \text{ cm} - 3 \text{ cm})$$

$$l = 18 \text{ cm} + 14 \text{ cm} = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$$

$$H = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 800}{0,32 \text{ m}} = 500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

oder:

$$H = \frac{0,2 \text{ A} \cdot 800}{32 \text{ cm}} = 5 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

Zur Bestimmung der magnetischen Induktion B suchen wir in der Magnetisierungskurve auf der waagerechten Achse den Punkt für $H = 500 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 5 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$. Von diesem Punkt gehen wir senkrecht nach oben, bis wir auf die Magnetisierungskurve für legiertes Blech stoßen. Vom Schnittpunkt der Senkrechten mit der Magnetisierungskurve gehen wir nun waagerecht nach links und lesen auf der senkrechten Achse den zugehörigen Wert für B ab. Es ergibt sich ein Wert von $11\,000 \text{ Gauß} = 1,1 \text{ Tesla}$. Die magnetische Induktion beträgt $11\,000 \text{ G}$ bzw. $1,1 \text{ T}$.

$$b) \Phi = B \cdot A$$

$$A = s \cdot d = 3 \text{ cm} \cdot 4 \text{ cm} = 12 \text{ cm}^2 = 0,0012 \text{ m}^2$$

$$\Phi = 1,1 \text{ T} \cdot 0,0012 \text{ m}^2 = 0,00132 \text{ Wb}$$

oder:

$$\Phi = 11000 \text{ G} \cdot 12 \text{ cm}^2 = 132000 \text{ M}$$

Der magnetische Fluß beträgt 0,00132 Weber bzw. 132000 Maxwell.

Beispiel 2: Wie groß ist jeweils die relative Permeabilität für Dynamoblech bei einer magnetischen Feldstärke von:

$$a) H = 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \quad \text{bzw.} \quad b) H = 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}} ?$$

Gegeben: $H_1 = 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$; $H_2 = 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$; Eisensorte: Dynamoblech.

Gesucht: μ_{r1} ; μ_{r2}

$$\text{Lösung: } \mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

Aus der Magnetisierungskurve ergeben sich folgende Werte für B :

$$\text{Bei } H_1 = 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \text{ beträgt } B_1 = 4800 \text{ G,}$$

$$\text{bei } H_2 = 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \text{ beträgt } B_2 = 13600 \text{ G.}$$

$$\mu_{r1} = \frac{4800}{1,257 \cdot 1} = 3820$$

$$\mu_{r2} = \frac{13600}{1,257 \cdot 10} = 1080$$

Die relative Permeabilität des Dynamoblechs hat

$$\text{bei } H = 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \text{ den Wert } 3820 \text{ und}$$

$$\text{bei } H = 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \text{ den Wert } 1080.$$

Das zweite Berechnungsbeispiel zeigt deutlich, wie die relative Permeabilität mit zunehmender Magnetisierung des Eisenkerns abnimmt.

1.6.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.6.

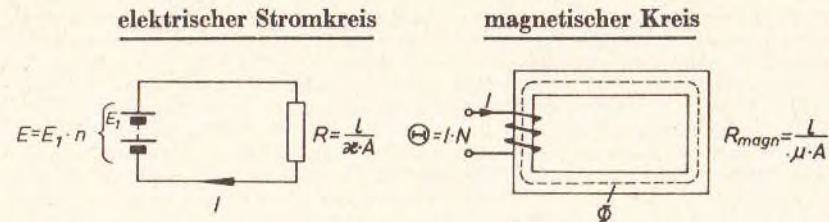
1. Weshalb werden nahezu alle auf magnetischer Wirkung beruhenden Bauteile mit Kernen aus ferromagnetischen Werkstoffen versehen? 2. Wie nennt man das Diagramm, das den Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke als Ursache und magnetischer Induktion einer Eisensorte als Wirkung darstellt? 3. Skizzieren Sie eine Hystereseschleife und geben Sie die wichtigsten Merkmale an! 4. Was versteht man unter Remanenz? 5. Erläutern Sie den Begriff Koerzitivfeldstärke! 6. Welche

Größe aus der Hystereseschleife kennzeichnet den Unterschied zwischen weich- und hartmagnetischen Werkstoffen? 7. Skizzieren Sie in ein Diagramm je eine Hystereseschleife für weich- und für hartmagnetischen Werkstoff! 8. Wie müßten die Hysteresekurven im Idealfall für weichmagnetischen und für hartmagnetischen Werkstoff aussehen? 9. Warum stellt man im allgemeinen für ferromagnetische Werkstoffe, die für Wechselstromvorgänge vorgesehen sind, Magnetisierungskurven dar? 10. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Hystereseschleife und der Magnetisierungskurve ein und derselben Eisensorte? 11. Anhand welches formelmäßigen Zusammenhangs läßt sich die relative Permeabilität einer Eisensorte für einen bestimmten Grad der Magnetisierung bestimmen? 12. Wie hängt die relative Permeabilität einer Eisensorte vom Grad der Magnetisierung ab?

1.7. Vergleich elektrischer Stromkreis — magnetischer Kreis

Um uns den Umgang mit magnetischen Größen zu erleichtern, wollen wir einmal die Größen des magnetischen Kreises den Größen des elektrischen Stromkreises gegenüberstellen. Nach der folgenden Tabelle lassen sich diese entsprechenden Größen vergleichen:

	elektrischer Stromkreis	magnetischer Kreis
Ursache	elektrische Spannung U oder EMK $\mathcal{E}$	magnetische Durchflutung (oder magn. Spannung) Θ
Widerstand	elektrischer Widerstand $R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$ (wobei $\kappa = \frac{1}{\rho} =$ elektrische Leitfähigkeit)	magnetischer Widerstand $R_{\text{magn.}} = \frac{l}{\mu \cdot A}$ (wobei $\mu = \mu_0 : \mu_r =$ magn. Leitfähigkeit oder Permeabili- tät)
Wirkung	elektrischer Strom $I = \frac{U}{R}$ (Ohmsches Gesetz) Stromdichte $S = \frac{I}{A}$	magnetischer Fluß $\Phi = \frac{\Theta}{R_{\text{magn.}}}$ (Ohmsches Gesetz des Magnetismus) magn. Flußdichte oder magn. Induktion $B = \frac{\Phi}{A}$



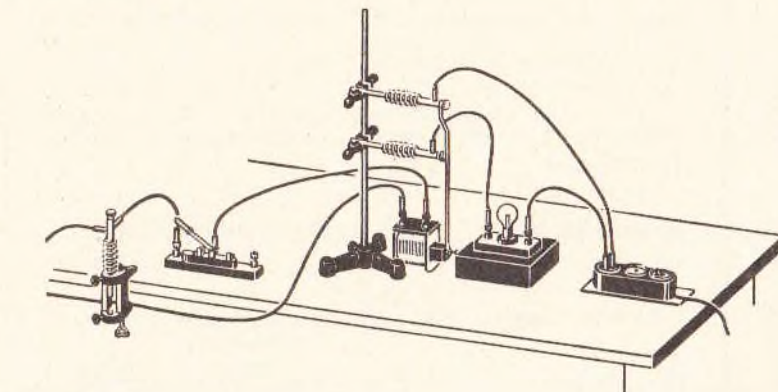
(Abb. 33)

Wenn auch wenig gebräuchlich, so ermöglicht der Begriff „magnetischer Widerstand“ doch einen sehr anschaulichen Vergleich mit dem elektrischen Widerstand. Zur Berechnung magnetischer Kreise mit verschiedenen magnetischen Widerständen (z. B. Eisenkern mit Luftspalt) kann man nämlich die für die Reihenschaltung von elektrischen Widerständen bekannte Formel $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$ sinngemäß anwenden.

1.8. Anwendungsbeispiele (Bauteile mit elektromagnetischer Wirkung)

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

1.8.1. Das Relais



= 6-8 V
~ 220 V

(Abb. 34)

Der Versuchsaufbau nach Abb. 34 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.

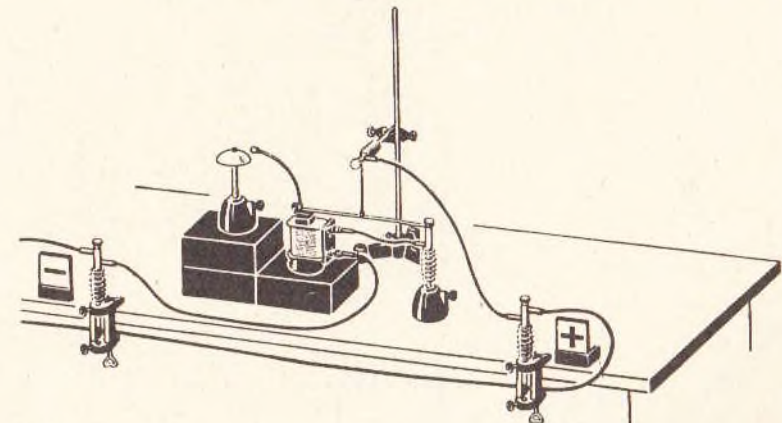
Dadurch wird die aus dem Netz (Starkstromkreis) gespeiste Glühlampe zum Leuchten gebracht. Der Schwachstrom muß gerade so groß sein, daß die Kraftwirkung des Elektromagneten groß genug ist, einen sicheren Kontaktschluß zu gewährleisten. Beim Ausschalten des Schwachstromkreises erlischt die Glühlampe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

Relais, die statt des Weicheisenkerns einen Dauermagneten haben, nennt man **gepolte Relais**. Gepolte Relais sind im Gegensatz zu den ungepolten stromrichtungs-empfindlich. Ihre Wirkungsweise ist mit der des Wechselstromweckers vergleichbar.

1.8.2. Der Wecker

Der Aufbau dieses Versuchs ist dem nach Abb. 34 ähnlich. Die Abb. 35b zeigt in einfacher Weise den Aufbau eines Gleichstromweckers. 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.

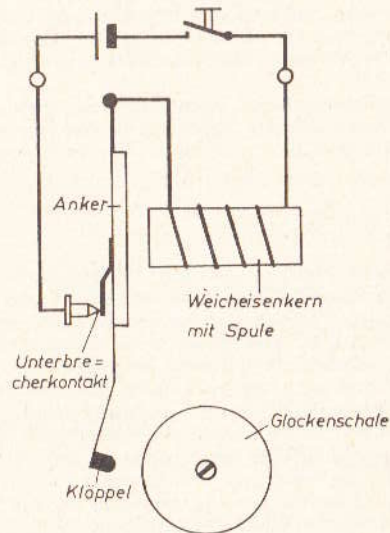
Gleichstromwecker (Versuchsaufbau)



= 3-4 V

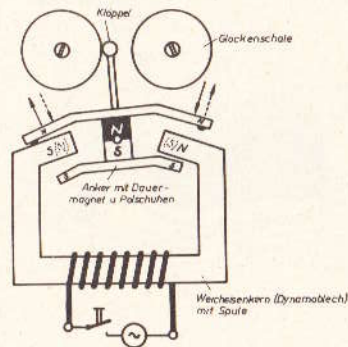
(Abb. 35a)

Gleichstromwecker (schematisch)



(Abb. 35b)

Wechselstromwecker



(Abb. 36)

Ein Wecker mit einem Aufbau nach Abb. 35 wird als **Gleichstromwecker** bezeichnet. Er kann jedoch auch mit Wechselstrom betrieben werden (Hausklingel). Die Abb. 36 zeigt uns das Schema eines modernen **Wechselstromweckers**. Auf einen Weicheisenkern, der meistens aus Dynamoblechen oder einem sog. Massekern besteht, ist eine Spule gewickelt. Der drehbar gelagerte Anker enthält einen Dauermagneten mit Polschuhen. Durch die Polschuhe werden die Pole des Dauermagneten infolge der magnetischen Influenz bis zu den Enden der Polschuhe vorgeschoben. Fließt durch die Spule ein Strom wechselnder Richtung, so entsteht in der Spule sowie in dem Weicheisenkern ein Magnetfeld wechselnder Richtung.

Entsteht z. B. im Weicheisenkern links ein Nord- und rechts ein Südpol, so wird nach dem Polgesetz

- an der linken Seite der Nordpol des Ankers abgestoßen sowie dessen Südpol angezogen,
- an der rechten Seite der Südpol des Ankers abgestoßen und dessen Nordpol angezogen.

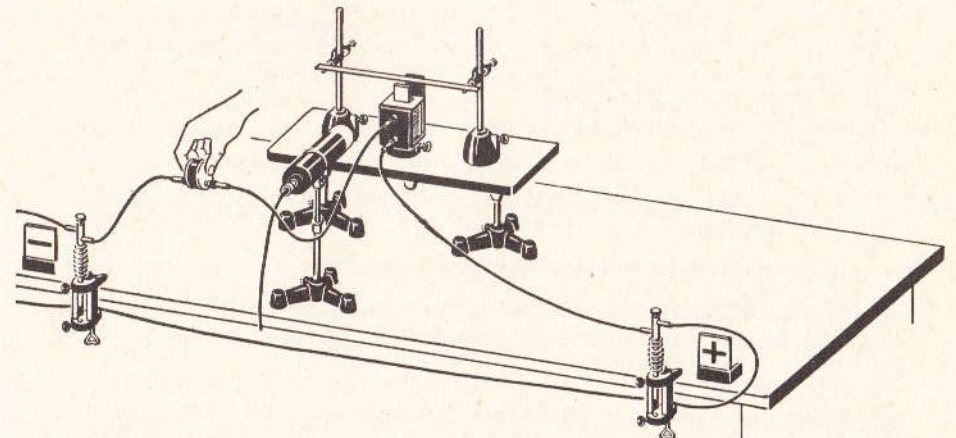
Dadurch kippt der Anker nach rechts. Kehrt der Spulenstrom und damit das Magnetfeld im Weicheisenkern seine Richtung um, so entsteht links ein Süd- und rechts ein Nordpol. Der Anker würde jetzt nach links kippen.

Der Anker pendelt also im Rhythmus der Stromrichtungswechsel hin und her und bringt mit dem Klöppel die Glocken (oder auch nur eine Glocke) zum Klingen.

1.8.3. Der Fernhörer

Die Versuchsanordnung nach Abb. 37 zeigt uns einen Fernsprechapparat, bei dem jedoch nur die Wirkungsweise des **Fernhörers** demonstriert werden soll.

Fernhörer



(Abb. 37)

Über dem Dauermagneten ist eine Blattfeder so angeordnet, daß sie gerade nicht mehr vom Magneten angezogen wird. In den Spulenstromkreis ist eine Büchse mit Kohlekörnern (Mikrofon) 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 das Magnetfeld des Dauermagneten verstärkt bzw. geschwächt wird und die Blattfeder im Rhythmus dieser Änderungen mehr oder weniger stark angezogen wird. Der Fernhörer überträgt also die von einem Mikrofon (hier Büchse) ausgehenden Stromschwankungen in Luftdruckänderungen (Schallwellen), die beim Fernsprecher von unserem Ohr wahrgenommen werden.

2. Die Wirkungen des Magnetismus

2.1. Die Kraftwirkung auf Eisen im Magnetfeld

Die Tatsache, daß ferromagnetische Stoffe von einem Dauer- oder Elektromagneten angezogen werden, haben wir schon in Grundversuchen kennengelernt. Wir wollen nun diese Kraft bestimmen. Dafür gelten folgende Formeln annähernd genau:

$$F \approx 4 \cdot B^2 \cdot A$$

wobei sich F in kp ergibt, wenn B in Tesla und A in cm^2 eingesetzt wird

oder

$$F \approx \left(\frac{B}{5000} \right)^2 \cdot A$$

wobei sich F in kp ergibt, wenn B in Gauß und A in cm^2 eingesetzt wird.

In diesen Formeln bedeuten:

F = die Kraft, mit der ein ferromagnetischer Stoff angezogen wird,

B = die magnetische Induktion in der Polfläche des Dauer- oder Elektromagneten und

A = die Polfläche des Dauer- oder Elektromagneten.

Zur Berechnung der Kraftwirkung, die von einem Hufeisenmagneten ausgeht, ist die Summe der Polflächen beider Pole einzusetzen.

Beispiel:

Im Eisenkern eines Haftrelais bleibt nach dem Ausschalten des Relaisstroms eine Remanenz von 0,8 Tesla erhalten. Die wirksame runde Polfläche hat einen Durchmesser von 3 mm. (Ein Haftrelais besitzt kein Anker-Trennblech!)

Wie groß ist die Kraft, mit der der Anker gehalten wird?

Gegeben: $B = 0,8 \text{ T} = 8000 \text{ G}$; $d = 3 \text{ mm}$

Gesucht: F

Lösung a): $F = 4 \cdot B^2 \cdot A$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,3 \text{ cm} \cdot 0,3 \text{ cm} \cdot \pi}{4} = 0,0437 \text{ cm}^2$$

$$F = 4 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,0437 \text{ kp}$$

$$F = \underline{\underline{0,112 \text{ kp} = 112 \text{ p}}}$$

oder

$$\text{Lösung b): } F = \left(\frac{B}{5000} \right)^2 \cdot A$$

$$F = \left(\frac{8000}{5000} \right)^2 \cdot 0,0437 \text{ kp}$$

$$= 1,6^2 \cdot 0,0437 = 2,56 \cdot 0,0437 \text{ kp}$$

$$F = \underline{\underline{0,112 \text{ kp} = 112 \text{ p}}}$$

Der Anker des Haftrelais wird mit einer Kraft von 112 p gehalten.

2.2. Die Fremdinduktion

2.2.1. Die Induktion der Bewegung

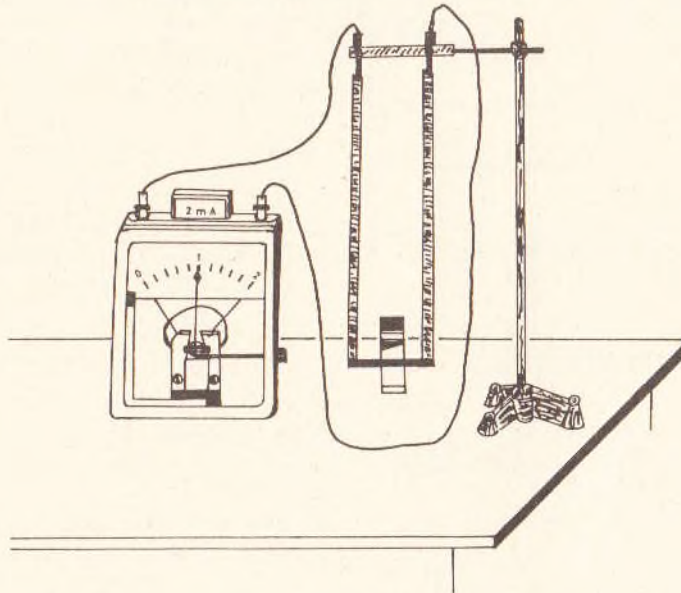
Im Abschnitt 1.3. haben wir festgestellt, daß durch die Änderung eines elektrischen Feldes = Bewegung von elektrischen Ladungen (= elektrischer Strom) ein Magnetfeld entsteht. Jetzt soll untersucht werden, ob dieser Vorgang umkehrbar ist, ob also durch die Änderung eines magnetischen Feldes elektrische Ladungen bewegt werden und damit eine elektrische Spannung bzw. elektrischer Strom erzeugt werden kann.

Dazu bedienen wir uns des Versuches nach Abb. 38. 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 Milliampere-meter verbunden, dessen Nullpunkt auf die Skalenmitte eingeregelt wird. Wir setzen nun den Leiter in Schwingung, so daß die Zahl der Feldlinien, die die Leiterschleife durchsetzen, geändert wird. Dabei beobachten wir folgenden Vorgang:

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

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

Stromerzeugung durch Induktion



(Abb. 38)

Drehen wir den Magneten um, so daß Nord- und Südpol vertauscht werden, so zeigt sich beim Hin- und Herschwingen des Leiters jeweils ein Ausschlag in entgegengesetzter Richtung zum vorherigen Versuch.

Wir haben damit festgestellt, daß ein elektrischer Strom entsteht, wenn der magnetische Zustand in einer Leiterschleife geändert wird. Dabei ist es unwesentlich, ob sich der Leiter bewegt und das Magnetfeld feststeht oder ob der Leiter feststeht und sich das Magnetfeld bewegt.

Da die Ursache für den elektrischen Strom immer eine Spannung ist, gilt die Regel:

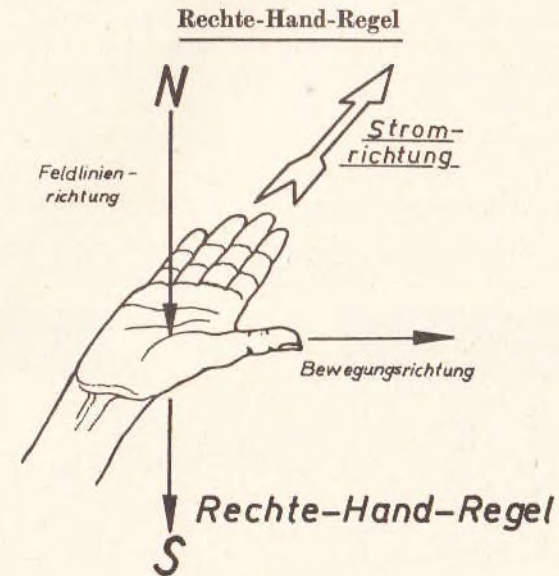
Wird der magnetische Fluß um einen Leiter geändert, so entsteht in ihm eine Induktionsspannung.

Bei geschlossenem Stromkreis hat die Induktionsspannung einen Induktionsstrom zur Folge.

2.2.1.1. Die Richtung der Induktionsspannung bzw. des Induktionsstromes der Bewegung

Anhand des Versuches nach Abb. 38 haben wir gesehen, daß die Richtung des Induktionsstromes davon abhing, in welche Richtung der Leiter sich bewegte und welche Richtung das Magnetfeld hatte. Wenn die Richtung des Magnetfeldes, die Bewegungsrichtung des Leiters und die Richtung des Zeigeranschlages genau im Zusammenhang beobachtet werden, kann man anhand der Beobachtungsergebnisse eine Regel zur Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes aufstellen, die sog. **Rechte-Hand-Regel**:

Läßt man die Feldlinien 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.



(Abb. 39)

Die Richtung des Induktionsstromes steht immer senkrecht (90°) zur Feldlinienrichtung des ursächlichen Magnetfeldes.

Da die Induktion der Bewegung bei Generatoren Anwendung findet, wird die Rechte-Hand-Regel auch als **Generator-Regel** bezeichnet. Dieser Regel liegt das Naturgesetz der Trägheit zugrunde.

Um das zu erkennen, müssen wir den Versuch nach Abb. 38 noch genauer beobachten. Dazu wird in den Stromkreis zwischen Leiterschleife und Milliampereometer ein Schalter gelegt. Lassen wir jetzt den Leiter bei zunächst geöffnetem Stromkreis schwingen und schließen während des Schwingens den Schalter, so können wir beim genauen Beobachten folgendes feststellen: Sobald der Schalter geschlossen wird, erfolgt eine geringfügige Abbremsung des Leiterpendels. Diese Abbremsung muß demnach durch den Induktionsstrom – genauer: durch dessen Magnetfeld – hervorgerufen werden.

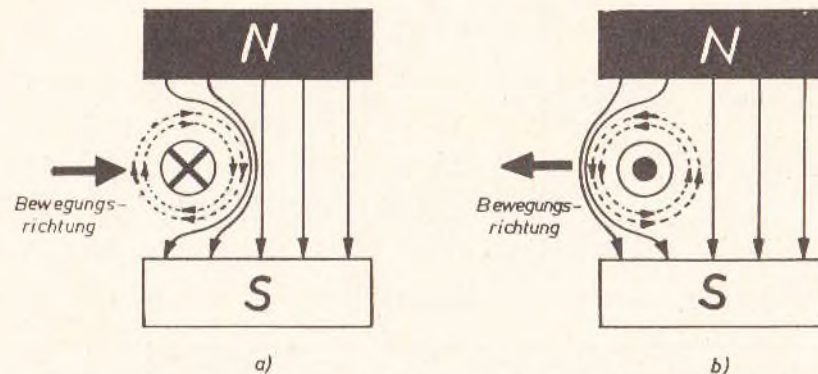
Dem Trägheitsgesetz zufolge versucht die Natur, einen einmal vorhandenen Zustand (z. B. Ruhe- oder Bewegungszustand) beizubehalten. Dieses Gesetz auf die Induktionsvorgänge angewendet finden wir in der **Lenz'schen Regel**:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er mit seinem Magnetfeld seine Entstehungsursache zu hemmen sucht.

Bei dem von uns untersuchten Vorgang ist die Ursache für die Entstehung des Induktionsstromes die durch Bewegung verursachte Änderung des magnetischen Flusses um den Leiter. Demnach muß nach der Lenz'schen Regel die Bewegung gehemmt werden. Die Beobachtung des Versuchs bestätigt das.

Der Zusammenhang zwischen der Bewegungsrichtung des Leiters im Magnetfeld und der Richtung des erzeugten Induktionsstromes wird durch folgende Abb. erläutert:

Die Richtung des Induktionsstromes



(Abb. 40)

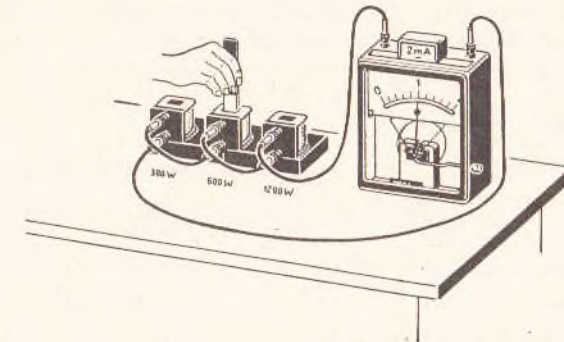
Bei der Leiterbewegung nach rechts (Abb. 40a) wird ein Induktionsstrom erzeugt, dessen Magnetfeld auf der rechten Seite des Leiters mit dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet ist (Korkenzieherregel ergibt Strom-

richtung). Anhand der Hilfsvorstellung von der magnetischen Feldlinie kann man vereinfacht sagen: Die magnetischen Feldlinien haben das Bestreben, sich zu verkürzen. Sie müssen demnach den Leiter nach links drängen. Die Leiterbewegung wird daher abgebremst. (Vergleiche: Gleichnamige Pole stoßen sich ab.) Wird der Leiter nach links bewegt (Abb. 40b), so entsteht ein Induktionsstrom, dessen Magnetfeld auf der rechten Seite des Leiters entgegengesetzt zum äußeren Feld und auf der linken Seite in gleicher Richtung mit dem äußeren Feld verläuft. Die magnetischen Feldlinien versuchen jetzt, den Leiter nach rechts zu drängen und bremsen somit die Leiterbewegung ab.

2.2.1.2. Die Höhe der Induktionsspannung der Bewegung

Bei dem Versuch nach Abb. 41 werden drei Spulen hintereinandergeschaltet (300, 600 und 1200 Windungen). Der Anfang der ersten Spule und das Ende der dritten Spule werden an ein Milliampereometer herangeführt. Nun läßt man einen Stabmagneten (natürlich immer mit dem gleichen Pol nach unten) nacheinander in die drei Spulen hineinfallen. 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.

Die Höhe der Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Leiterlänge (Windungszahl) und Schnelligkeit der Flußänderung



(Abb. 41)

Wir stellen fest:

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

Wir wollen nun den Stabmagneten in die Spule mit den 1200 Windungen (Abb. 41) 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.

Daraus folgt:

Die Höhe der Induktionsspannung wächst mit der Schnelligkeit der Flußänderung.

Im folgenden Versuch verwenden wir wieder eine Spule mit 1200 Windungen und einem angeschlossenen Meßinstrument. Nun tauchen wir nacheinander mit gleicher Geschwindigkeit einmal einen Stabmagneten und einmal einen magnetisierten Stab aus weichem Stahl in die Spule und beobachten den Zeigerausschlag. Dabei zeigt sich, daß der Zeigerausschlag beim Eintauchen des Stabmagneten größer ist als beim Eintauchen des magnetisierten Stahlstabes.

Da das Magnetfeld des Stabmagneten eine höhere magnetische Induktion aufweist, können wir folgern:

Die Höhe der Induktionsspannung wächst bei gleicher wirksamer Leiterlänge¹⁾ und gleicher Schnelligkeit der Bewegung mit der magnetischen Induktion.

Bei der Bewegung eines Leiters im Magnetfeld (oder eines Magnetfeldes um einen Leiter) hängt die Schnelligkeit der Flußänderung von der Bewegungsgeschwindigkeit v ab.

Wir können nun unsere Erkenntnisse zusammenfassen:

Die Höhe der Induktionsspannung E ist um so größer, je größer die wirksame¹⁾ Leiterlänge l , je größer die Bewegungsgeschwindigkeit v und je größer die magnetische Induktion B ist.

Als Formel ergibt sich:

Größengleichung

$$E = B \cdot l \cdot v$$

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}$$

Einheitengleichung

$$V = \frac{Vs}{m^2} \cdot m \cdot \frac{m}{s}$$

T (Tesla)

$$V = \frac{Vs}{cm^2} \cdot cm \cdot \frac{cm}{s}$$

G (Gauß)

¹⁾ Unter der wirksamen Leiterlänge versteht man den Teil, der sich innerhalb des Magnetfeldes befindet.

Darin bedeuten:

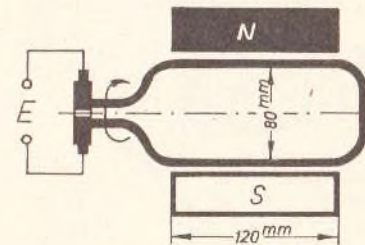
E = erzeugte Induktionsspannung in Volt,

B = magnetische Induktion in Tesla bzw. Gauß,

l = wirksame Leiterlänge in m bzw. cm,

v = Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters in $\frac{m}{s}$ bzw. $\frac{cm}{s}$.

Wegen der Beziehung $1 \text{ Gauß} = \frac{10^{-8} V_s}{cm^2}$ steht in der unteren Formel der Faktor 10^{-8} (siehe hierzu unter Abschnitt 1.5.4.).



(Abb. 42)

Beispiel: Eine Leiterschleife von 80 mm Durchmesser wird in einem Magnetfeld gedreht, dessen magnetische Induktion 0,8 Tesla ($\triangleq$ 8000 Gauß) beträgt.

Die Länge der Magnetpolschuhe beträgt 120 mm, die Drehzahl $750 \frac{U}{min}$.

Wie hoch ist die in der Leiterschleife erzeugte Induktionsspannung?

Gegeben: $B = 0,8 \text{ T} = 8000 \text{ G}$; $n = 750 \frac{U}{min}$;

Schleifendurchmesser $d = 80 \text{ mm}$; Länge des Magnetfeldes 120 mm.

Gesucht: E

Lösung: $E = B \cdot l \cdot v$

$$l = 2 \cdot l_1 = 2 \cdot 12 \text{ cm} = 24 \text{ cm} = 0,24 \text{ m}$$

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{8 \text{ cm} \cdot 3,14 \cdot 750}{60} \frac{1}{min}$$

$$= \frac{1884 \text{ cm}}{60} \frac{s}{min}$$

$$v = 314 \frac{cm}{s} = 3,14 \frac{m}{s}$$

$$E = 0,8 \frac{Vs}{m^2} \cdot 0,24 \text{ m} \cdot 3,14 \frac{m}{s} = 0,602 \text{ V}$$

Es wird eine Spannung von 0,602 V erzeugt.

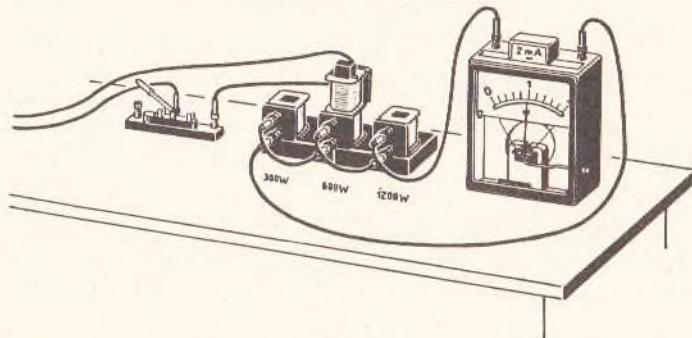
2.2.2. Die Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)

Ursache für die Entstehung einer Induktionsspannung ist die Änderung des magnetischen Flusses um einen Leiter. Die Änderung des magneti-

schen Flusses um den Leiter braucht aber nicht durch die Bewegung des Leiters oder des Magnetfeldes hervorgerufen zu werden. Sie kann auch beispielsweise durch die Änderung der Stromstärke oder der Stromrichtung in einer Spule bewirkt werden.

Zum Beweis führen wir einen Versuch nach Abb. 43 durch.

Die Induktion der Ruhe



(Abb. 43)

Es genügt zunächst, den Versuch nur mit der mittleren Spule (600 Wdg) durchzuführen. Auf den langen Eisenkern dieser Spule wird eine Spule mit 600 Windungen geschoben. Diese Spule wird über einen Schalter mit einer Gleichstromquelle (ca. 2...4 V) verbunden. Die in Reihe geschalteten unteren drei Spulen sind mit einem Meßinstrument (Zeiger in Mittelstellung) verbunden. Wird der Stromkreis durch den Schalter geschlossen, so schlägt der Zeiger des Meßinstruments aus. Beim Öffnen des Schalters beobachten wir einen Ausschlag in entgegengesetzter Richtung. Wichtig ist, daß wir erkennen, daß nur jeweils beim Schließen oder Öffnen des Schalters ein Zeigerausschlag erfolgt. Wir ersetzen jetzt den Schalter durch einen Schiebewiderstand. Nach dem Einschalten des Stromkreises steht der Zeiger genau in der Mitte. Ändern wir aber den Widerstand und damit die Stromstärke in der Spule, so zeigt sich ein mehr oder weniger großer Zeigerausschlag. Lassen wir den Schiebewiderstand auf irgend einem beliebigen Wert, so steht der Zeiger wieder auf Null.

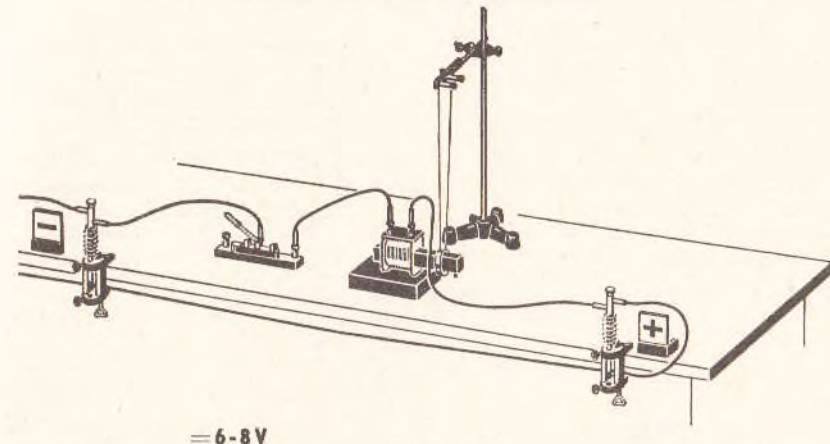
Daraus können wir folgern:

Immer dann, wenn sich die Stromstärke in einer Spule und damit ihr Magnetfeld ändert, wird in einer magnetisch (induktiv) gekoppelten zweiten Spule eine Induktionsspannung und bei geschlossenem Stromkreis ein Induktionsstrom erzeugt. Da dieser Vorgang nicht auf Bewegung beruht, spricht man auch von der Induktion der Ruhe.

2.2.2.1. Die Richtung der Induktionsspannung bzw. des Induktionsstromes der Ruhe

Um die Richtung des durch Induktion der Ruhe erzeugten Induktionsstromes zu bestimmen, führen wir einen Versuch nach Abb. 44 durch:

Die Induktion der Ruhe (Richtung des Induktionsstromes)



(Abb. 44)

Über den langen Eisenkern einer Spule wird ein an einem Faden aufgehängter Aluminiumring geschoben. Die Spule kann über einen Schalter mit einer Gleichstromquelle (ca. 6...8 V) verbunden werden.

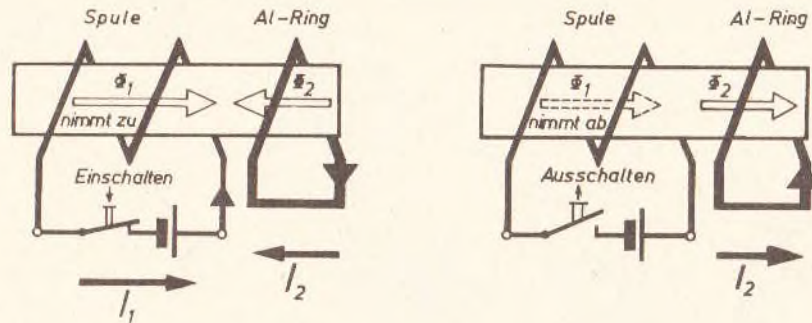
Wir können folgendes beobachten: Wird der Schalter geschlossen, so wird der Aluminiumring von der Spule abgestoßen. Beim Unterbrechen des Stromkreises wird dagegen der Aluminiumring zur Spule hingezogen.

Zur Erklärung ziehen wir wieder das Lenzsche Gesetz heran: Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er mit seinem Magnetfeld seine Entstehungsursache zu hemmen sucht. Beim Einschalten des Spulenstromes nimmt der magnetische Fluß im Eisenkern und damit auch im Aluminiumring zu. Der Induktionsstrom im Aluminiumring wirkt dem entgegen, indem durch ihn ein Magnetfeld entgegengesetzter Richtung erzeugt wird. Entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder stoßen sich ab. Nach der Korkenzieherregel können wir die Stromrichtung bestimmen (siehe Abb. 45). Mit dem Abschalten des Spulenstromes wird der magnetische Fluß im Eisenkern sowie im Al-Ring verringert. Der im Al-Ring erzeugte Induktionsstrom wirkt der Verringerung entgegen, indem er ein Magnetfeld gleicher Richtung wie das ursprüngliche Magnetfeld der Spule aufbaut (Abb. 45 rechts).

Wir fassen zusammen:

Bei der Verstärkung des Magnetfeldes (Zunahme des magnetischen Flusses beim Einschalten des Spulenstromes) ist das Magnetfeld des Induk-

Die Richtung des Induktionsstromes der Ruhe



(Abb. 45)

tionsstromes entgegengesetzt, bei einer Schwächung des Magnetfeldes (Abnahme des magnetischen Flusses beim Abschalten des Spulenstromes) ist das Magnetfeld des Induktionsstromes mit dem Spulenfeld gleichgerichtet.

Die Richtung des Induktionsstromes hängt von der Richtung des ursächlichen magnetischen Flusses und davon ab, ob der magnetische Fluß verstärkt oder geschwächt wird.

2.2.2.2. Die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe

Wir wollen jetzt den Versuch nach Abb. 43 größenmäßig untersuchen und beginnen mit der mittleren Spule. Die auf den gleichen Eisenkern geschobene zweite Spule wird über den Schalter zunächst an 1 Volt Spannung gelegt. Beim Einschalten lesen wir den Zeigerausschlag ab. Dann wird die Spannung auf 2 Volt erhöht. Der Zeigerausschlag ist beim Einschalten nun ebenfalls größer geworden. Da sich der Widerstand im Stromkreis sowie Windungszahl und Abmessungen der Spule nicht verändert haben, ist die Stromstärke und damit der magnetische Fluß in der Spule direkt (Hysteresis!) von der angelegten Spannung abhängig. Daher gilt:

Die Höhe der Induktionsspannung wächst mit dem magnetischen Fluß (bei gleicher Änderungsschnelligkeit).

Anschließend wollen wir die Spule an 2 Volt Spannung legen und ihren Eisenkern in die linke Spule (300 Windungen) stecken. Beim Einschalten zeigt sich ein kleinerer Zeigerausschlag. Beobachten wir dagegen den Zeigerausschlag, wenn die rechte Spule (1200 Windungen) durch den Eisenkern mit der oberen Spule gekoppelt ist, so ergibt sich ein wesentlich größerer Zeigerausschlag.

Folglich:

Die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe wächst mit der Windungszahl (bei gleicher Schnelligkeit der magnetischen Flußänderung).

Da der gesamte magnetische Fluß im Eisenkern verläuft, ist es einerlei, welche Drahtlänge eine Spule hat. Jede Windung (= Leiterschleife) einer Spule wird ja von der gleichen Flußänderung betroffen. Daher ist nur die Windungszahl entscheidend für die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe.

Die folgende Messung soll noch einmal mit der mittleren Spule durchgeführt werden. An Stelle des Schalters wird ein Schiebewiderstand in den Stromkreis der oberen Spule geschaltet (ca. 4 V). Wenn wir jetzt den Widerstand langsam regeln, werden wir nur einen sehr geringen Zeigeranschlag feststellen. Bei schnellem Herunter- oder Heraufregeln des Widerstandes ist der Zeigerausschlag deutlich größer.

Da bei der erforderlichen Änderung normalerweise Wechselstromspeisung angewendet wird, kann man sagen:

Die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe wächst mit der Frequenz der Feldänderung, also mit der Frequenz des erzeugenden Wechselstromes.

Für die Induktionsspannung der Ruhe ergibt sich folgender formelmäßiger Zusammenhang:

Größengleichung

$$E = B \cdot A \cdot N \cdot f \cdot 4,44$$

Einheitengleichung

$$V = \frac{Vs}{m^2} \cdot m^2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{Hz}$$

T. (Tesla)

oder

$$E = \frac{B \cdot A \cdot N \cdot f \cdot 4,44}{10^8}$$

$$V = \frac{Vs}{cm^2} \cdot cm^2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{Hz}$$

G (Gauß)

Darin bedeuten:

E = erzeugte Induktionsspannung in Volt,

B = Höchstwert der magnetischen Induktion im Eisenkern (Sättigung beachten) in Tesla bzw. Gauß,

A = Eisenquerschnitt des Kerns in m^2 bzw. cm^2 ,

N = Windungszahl der Spule, in der die Spannung erzeugt wird,

f = Frequenz des erzeugenden Wechselstroms in Hz ($= \frac{1}{s}$).

Der Faktor 4,44 ergibt sich aus $\frac{2\pi}{\sqrt{2}}$. Begründung:

Bei sinusförmigem Wechselstrom muß mit der sog. Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ gerechnet werden und der Effektivwert der Wechselspannung ergibt sich aus $\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$.

Wegen der möglichen Sättigung des Eisenkerns wird mit $B_{\max}$ gerechnet.

Das Verfahren, Induktionsspannungen und -ströme durch Spannungs- bzw. Stromänderung zu erzeugen, findet beim Transformator und Fernmeldeübertrager Anwendung. Die eben abgeleiteten Formeln dienen vorwiegend zur Berechnung der Windungszahlen für Transformatoren.

Beispiel:

Wie viele Windungen muß die Wicklung eines Transformators erhalten, wenn in ihr eine Spannung von 24 Volt erzeugt werden soll. Der Transformator wird mit 50-Hz-Wechselstrom gespeist. Sein Eisenkern hat einen Querschnitt von 4 cm^2 . Die Induktion im Eisenkern erreicht einen Höchstwert von 11000 Gauß.

Gegeben: $E = 24 \text{ V}$; $B = 11000 \text{ G}$; $A = 4 \text{ cm}$; $f = 50 \text{ Hz}$

Gesucht: N

$$\text{Lösung: } E = \frac{B \cdot A \cdot N \cdot f \cdot 4,44}{10^8}$$

$$N = \frac{E \cdot 10^8}{B \cdot A \cdot f \cdot 4,44} = \frac{24 \text{ V} \cdot 10^8}{11000 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot 4 \text{ cm}^2 \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} \cdot 4,44}$$

$$N = \underline{\underline{246}} \quad \text{Die Wicklung muß 246 Windungen erhalten.}$$

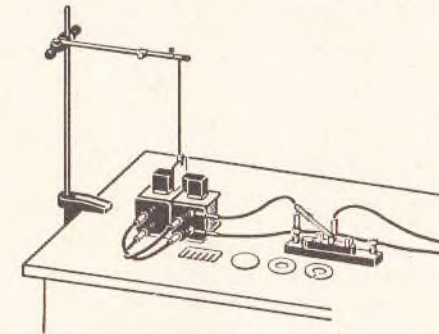
2.2.3. Wirbelströme

Wir wollen einen Versuch nach Abb. 46 durchführen. Die Spulen der beiden Elektromagnete werden so geschaltet, daß sich ihre magnetischen Felder addieren. In dieses starke Kraftfeld lassen wir einen Pendelkörper 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 Magnetfelder der 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 ein hoher Kurzschlußstrom entsteht. Der Strom hat hier jedoch nicht eine bestimmte Richtung wie in einem geraden Leitungsdraht, sondern er wirbelt in der Scheibe frei

¹⁾ Siehe hierzu unter Abschnitt 3.1.

Die Wirkung von Wirbelströmen



(Abb. 46)

umher, er ist ein **Wirbelstrom**. Nach dem Lenzschen Gesetz sucht der Induktionsstrom mit seinem Magnetfeld 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 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.

2.2.3.1. Die Wirbelstrombremsung

Bei dem Versuch nach Abb. 47 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 so weit abgebremst, daß sie aus der Beschleunigung in eine gleichförmige Bewegung übergeht. Die richtige Steuerung der Abbremsung geschieht dabei durch Regeln des Feldstromes.

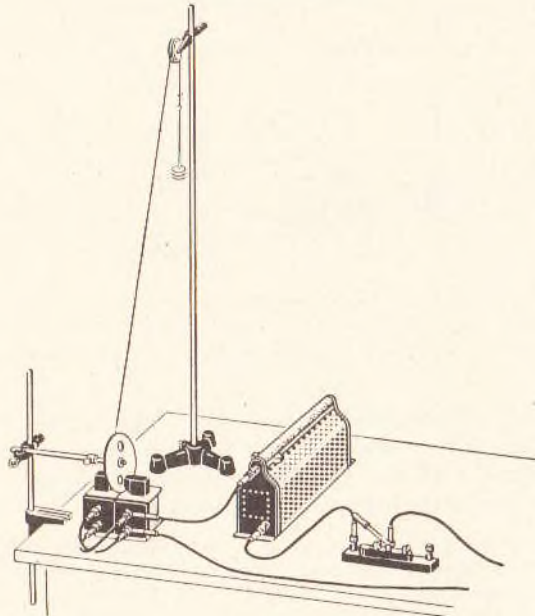
Diese hier im Versuch beschriebene **Wirbelstrombremse** wird in der Praxis zur Dämpfung von Meßsystemen¹⁾, Zählwerken, Elektrischen Waagen usw. verwendet.

2.2.3.2. Die Verringerung der Wirbelströme

Wir haben bei dem Versuch nach Abb. 46 gesehen, daß die Wirbelströme in der geschlitzten Scheibe nur gering waren. Sollen also die Wirbelströme verringert

¹⁾ Vgl. Band B 5 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Buchreihe Aft“.

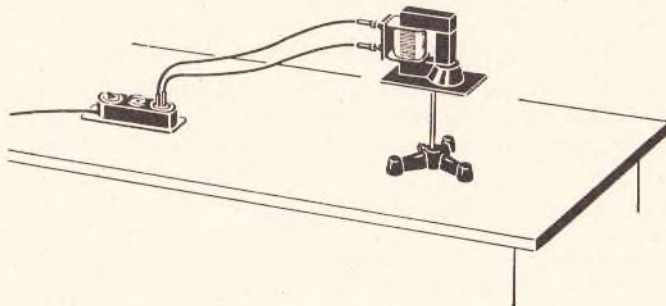
Wirbelstrombremse



(Abb. 47)

werden, muß man die Metallmasse möglichst fein unterteilen. Der Versuch nach Abb. 48 wird uns das bestätigen. Wir verwenden hier einen Strom, der in der Sekunde 100mal seine Richtung ändert, das ist der technische Wechselstrom unserer Stromversorgungsnetze. Durch diesen Strom wird der magnetische Kraftfluß des Elektromagneten ebensooft seine Richtung ändern.

Wirbelstromverluste



(Abb. 48)

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 geblättern 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 Kraftflusses (100mal 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 Wärmeverluste können niedriggehalten werden, wenn man das Joch und 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.

Da das ursächliche Magnetfeld und der erzeugte Induktionsstrom (Wirbelstrom) immer senkrecht zueinander stehen, müssen die Bleche so angeordnet werden, daß sie für den magnetischen Fluß einen geringen magnetischen und für den Induktionsstrom (Wirbelstrom) einen hohen elektrischen Widerstand darstellen.

In der Hochfrequenztechnik (Rundfunk, Fernsehen, Übertragung der Sprache und Musik überhaupt) genügen die feingeblätternen (feinlamellierten) Kerne nicht zur Verhinderung der Wirbelströme, weil durch die sehr schnellen Richtungsänderungen der Ströme sich auch das magnetische Feld 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 klein gehalten, 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 geblättern Kernen, weil die magnetischen Kraftlinien die mit Isoliermasse ausgefüllten Zwischenräume zwischen den einzelnen Eisenkörnchen überbrücken müssen, der Isolierstoff aber nur geringe magnetische Leitfähigkeit besitzt.

2.2.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2.

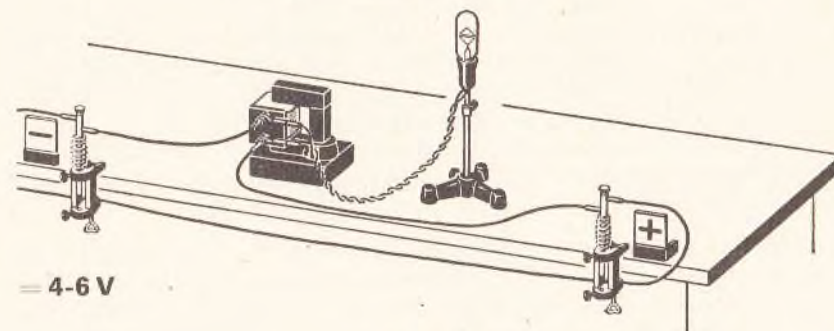
1. Unter welcher Voraussetzung wird eine Induktionsspannung erzeugt?
2. Wie lautet die Rechte-Hand-Regel (Generatorregel) zur Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes?
3. Auf welchem Naturgesetz beruht die Lenzsche Regel?
4. Was besagt die Lenzsche Regel?
5. Wovon hängt die Höhe der Induktionsspannung der Bewegung ab?
6. Geben Sie eine Formel zur Berechnung der Induk-

tionsspannung der Bewegung an! 7. In welchen Einheiten müssen die Größen in die Formel zur Berechnung der Induktionsspannung eingesetzt werden? (Stellen Sie eine Einheitengleichung auf!) 8. Erläutern Sie die Entstehung einer Induktionsspannung der Ruhe! Was ist hier die Ursache? 9. Von welchen Faktoren hängt die Richtung des Induktionsstromes der Ruhe ab? 10. Geben Sie die Formel zur Berechnung der Induktionsspannung der Ruhe an und stellen Sie eine entsprechende Einheitengleichung auf! 11. Wo findet das Verfahren, Induktionsspannungen der Ruhe zu erzeugen, Anwendung? 12. Was ist Ursache für die Entstehung von Wirbelströmen? 13. Warum muß man in Bauteilen versuchen, die Bildung von Wirbelströmen soweit wie möglich zu unterbinden? 14. Wie kann man Wirbelströme verringern? 15. Wie muß der Eisenkern eines Transformators aufgebaut sein, damit er einerseits einen guten Induktionsvorgang ermöglicht und andererseits die Entstehung von Wirbelströmen weitgehend unterbindet? 16. Was versteht man unter Wirbelstrombremsung und wo wird sie angewendet?

2.3. Die Selbstinduktion

Bei dem Versuch nach Abb. 49 wird der Stromkreis der Spule mit einer Spannung von 6 Volt betrieben. Parallel zur Spule wird eine Glühlampe mit einer Zündspannung von ca. 70...80 Volt gelegt. Wird der Stromkreis geschlossen, 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 mindestens 70 Volt vorhanden sein muß, obwohl an die Spule nur 6 Volt angelegt worden sind. Worin hat die hohe Spannung ihre Ursache?

Selbstinduktionsspannung



(Abb. 49)

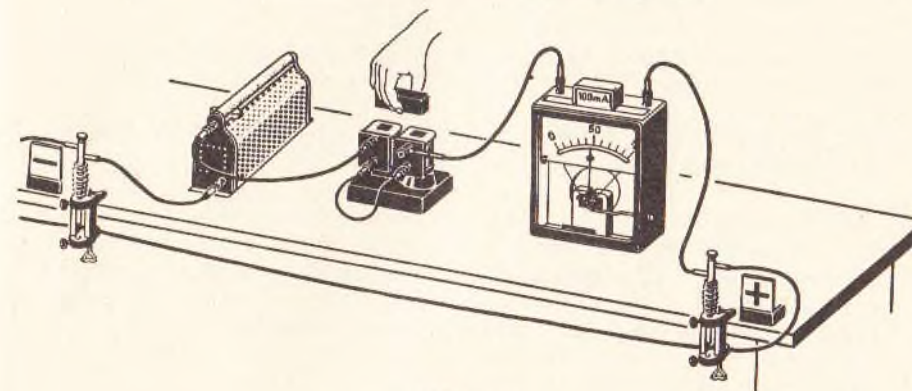
In dem Augenblick, in dem der Stromkreis geöffnet wird, bricht das Magnetfeld plötzlich zusammen. Das entspricht einer schnellen starken Änderung des magnetischen Feldes, die in der Spule (Leiter) eine Spannung induziert. Diese Spannung ist sehr hoch infolge der hohen Windungszahl (1200 Wdgn) und der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

Da hier eine Induktionsspannung durch die Änderung des magnetischen Flusses im Leiter (Spule) selbst entsteht (in unserem Beispiel durch Stromänderung in der Spule verursacht), spricht man auch von einer **Selbstinduktionsspannung** oder von der **EMK der Selbstinduktion**. Die Entstehung der Selbstinduktionsspannung ist auf die Induktion der Ruhe zurückzuführen und beruht auf den gleichen Gesetzmäßigkeiten.

2.3.1. Die Richtung des Selbstinduktionsstromes

Bei dem Versuch nach Abb. 50 bleibt der Eisenkern der 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 auf und ent-

Die Richtung des Selbstinduktionsstromes



(Abb. 50)

fernen 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 Jochs wird der magnetische Fluß in der Spule stärker (geringerer magnetischer Widerstand). Infolge Änderung des magnetischen Flusses wird in der Spule ein Selbstinduktionsstrom erzeugt. Nach dem Lenzschen Gesetz muß dieser Induktionsstrom so gerichtet sein, daß er mit seinem Magnetfeld seiner Entstehungsursache entgegenwirkt. Entstehungsursache ist hier die Zunahme des magnetischen Flusses. Dieser Zunahme muß das Magnetfeld des Selbstinduktionsstromes entgegenwirken. **Der Selbstinduktionsstrom ist also dem Spulenstrom entgegengerichtet** und schwächt somit den fließenden Strom.

Mit dem Entfernen des Jochs wird der magnetische Fluß in der Spule schwächer (größerer magnetischer Widerstand). Der Selbstinduktionsstrom versucht mit seinem Magnetfeld der Schwächung des magnetischen Flusses entgegenzuwirken. Er muß also jetzt die gleiche Richtung wie der Spulenstrom haben und damit zum Ansteigen des fließenden Stromes führen.

2.3.2. Die Höhe der Selbstinduktionsspannung

Wir haben in dem Versuch nach Abb. 49 das Vorhandensein einer Induktionsspannung festgestellt. Nach den 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.

Da die Entstehung der Selbstinduktionsspannung auf das Prinzip der Induktion der Ruhe zurückgeführt werden kann, folgern wir

Die Selbstinduktionsspannung ist um so höher, je stärker und je schneller der magnetische Fluß geändert wird.

Beim Vorgang der Selbstinduktion wird die Änderung des magnetischen Flusses durch Stromänderung im Leiter selbst oder durch die Änderung des magnetischen Widerstands, die Schnelligkeit der Änderung durch z. B. eine höhere Frequenz des Spulenwechselstroms erreicht. Die größte Schnelligkeit wird durch Ein- oder Ausschalten bewirkt.

2.3.3. Die Induktivität

Die Größe der Selbstinduktionsspannung ist von den gleichen Faktoren abhängig wie die Induktionsspannung. Sie wächst mit der Länge des Leiters (Windungszahl) und mit der Geschwindigkeit der Flußänderung. Bei der eisenlosen Spule kann man an Stelle der magnetischen Induktion den Strom berücksichtigen, weil bei festgelegter Windungszahl und Spulenlänge die Stärke des Magnetfeldes nun nur noch von der Stromstärke abhängig ist. Die Schnelligkeit der Flußänderung ist von der Häufigkeit der Stromrichtungsänderungen (100mal in der Sekunde bei technischem Wechselstrom) abhängig.

Die Selbstinduktion einer Spule bezeichnet man mit dem Formelzeichen L . Man spricht auch statt von der Selbstinduktion von der **Induktivität** einer Spule. Die Maßeinheit der Induktivität ist das Henry¹⁾ (H).

¹⁾ Henry, amerikanischer Physiker, 1797–1878.

Man hat festgelegt:

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

Daher kann man an Stelle der Maßeinheit Henry auch die Maßeinheit $\frac{V \cdot s}{A}$ einsetzen.

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

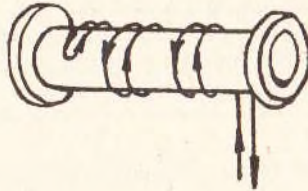
Die Induktivität einer Spule wird durch einen Eisenkern vergrößert, weil bei gleichem Spulenstrom der magnetische Fluß in der Spule ansteigt. Die Stärke des magnetischen Flusses ist u. a. von der magnetischen Leitfähigkeit abhängig. Deshalb hat eine Spule mit Eisenkern auf Grund der besseren Leitfähigkeit des Eisens gegenüber Luft ein stärkeres Magnetfeld und damit eine höhere Induktivität. Die höchste Induktivität wird bei vollem Eisenschluß einer Spule erreicht.

2.3.3.1. Schädliche Auswirkung der Induktivität

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 vor dem Ausschalten parallel zur Spule einen ohmschen Widerstand legt oder aber die Spule kurzschließt.

Auch in der Fernmeldetechnik kann sich die Selbstinduktionsspannung nachteilig auswirken. Wird ein Gleichstromkreis, in dem z. B. ein Relais liegt, durch einen Schalter (z. B. Relaiskontakt) unterbrochen, so wird infolge der sehr schnellen Stromänderung eine sehr hohe Selbstinduktionsspannung in der Induktivität des Relais erzeugt. Die hohe Selbstinduktionsspannung führt zu einem Funkenüberschlag, der mit einer Verbrennung des Kontaktmaterials verbunden ist. Um diese Verbrennung zu verhindern, wird parallel zu den Kontakten ein Funkenlöschkreis geschaltet. Der Funkenlöschkreis besteht aus einer Reihenschaltung von Kondensator und Wirkwiderstand. Der Kondensator schließt gewissermaßen die hohe Spannung kurz und lädt sich dabei auf. Aufgabe des Wirkwiderstands ist es, den Entladungsstrom des Kondensators beim Schließen des Kontakts zu begrenzen.

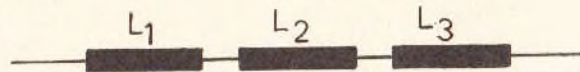
Ein Drahtwiderstand, wie er als Bauelement der Fernmeldetechnik überall verwendet wird, gleicht einer Spule. Er stellt also auch eine Induktivität dar. In vielen Fällen ist aber diese Induktivität unerwünscht. Deshalb werden die Widerstände bifilar gewickelt, wie es die Abb. 51 zeigt. In der bifilaren (zweidrähtigen) Wicklung, in der die Stromrichtungen entgegengesetzt sind (siehe Pfeile in Abb. 51), heben sich die magnetischen Felder gegenseitig auf. Es kann keine Induktionsspannung entstehen.

Bifilarwicklung

(Abb. 51)

2.3.3.2. Die Schaltung von Induktivitäten

Die Induktivität ist ein Maß für die bei Stromänderung erzeugte Selbstinduktionsspannung. Da bei der **Reihenschaltung** von Induktivitäten jede Teilinduktivität von der gleichen Stromänderung betroffen wird, wird in jeder Teilinduktivität auch eine ihrer Größe entsprechende Selbstinduktionsspannung erzeugt. Die gesamte Selbstinduktionsspannung der Reihenschaltung ist gleich der Summe der einzelnen Selbstinduktionsspannungen. Daraus folgt, daß sich die Induktivitäten ergänzen.



(Abb. 52)

Reihenschaltung:

Die Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Teilinduktivitäten.

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

Beispiel:

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

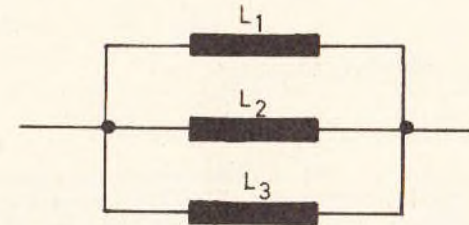
Gegeben: $L_1 = 0,8 \text{ H}; \quad L_2 = 1,5 \text{ H}; \quad L_3 = 2,5 \text{ H}$

Gesucht: L

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

Bei der **Parallelschaltung** von Induktivitäten fließt über jede Teilinduktivität nur ein Teil des Gesamtstromes (Stromverzweigung). Daher wird bei einer Stromänderung in jeder Teilinduktivität auch nur eine dem

Stromanteil und der Teilinduktivität entsprechende Selbstinduktionsspannung erzeugt. Die an der Parallelschaltung wirksame Selbstinduktionsspannung ist also kleiner, als wenn der gesamte Strom über nur eine Induktivität fließen würde.



(Abb. 53)

Daraus folgt für die

Parallelschaltung:

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

Gesucht: L

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

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

2.3.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.3.

1. Erklären Sie das Entstehen einer Selbstinduktionsspannung! 2. Von welchen Faktoren ist die Induktivität abhängig? 3. Eine Spule hat eine Induktivität von 0,0475 H. Wieviel mH sind das? 4. Auf welche Weise kann man unerwünschte Induktivität unterbinden? 5. Warum entsteht an einem Schalter, mit dem ein Spulenstromkreis geschaltet wird, beim Ausschalten ein Funke, aber nicht beim Einschalten? 6. Was ist eine Bifilarwicklung? 7. Wie verhalten sich Induktivitäten beim Zusammenschalten im Vergleich zu Widerständen? 8. Wie groß ist die gesamte

Induktivität zweier in Reihe geschalteter Spulen, die beide eine Induktivität von 0,75 H haben? 9. 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? 10. 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?

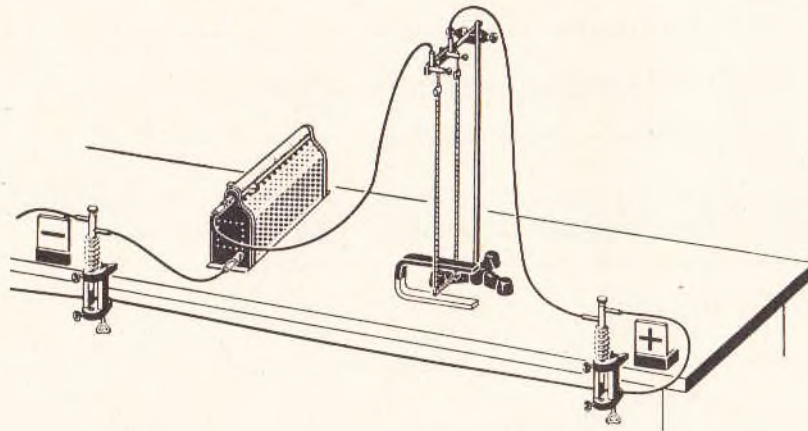
2.4. Bewegung durch Induktion

2.4.1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 54 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 in das Magnetfeld 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 statt dessen den Magneten um, so wird der Leiter wieder aus dem Magneten herausbewegt.

Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld



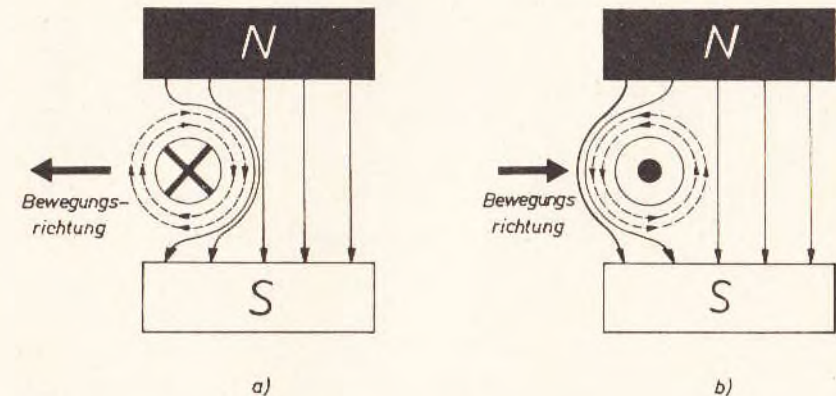
(Abb. 54)

Wir stellen fest:

1. Ein stromdurchflossener Leiter erhält im Feld 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. 55 erläutert werden. Im ersten Fall (Abb. 55a) 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.

In Abb. 55b kommt der Strom im Leiter auf den Beschauer zu und bildet ein linksdrehendes Feld um den Leiter. Durch dieses Feld werden die Feldlinien im Magneten rechts fast aufgehoben, weil sie entgegengesetzt verlaufen. Rechts wird das Feld geschwächt. Links vom Leiter summieren



(Abb. 55)

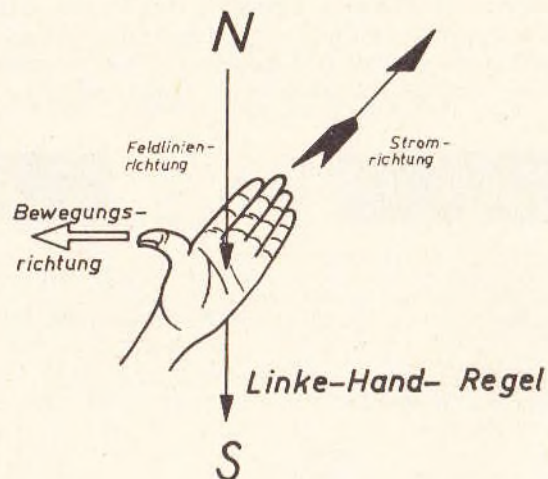
sich die Feldlinien um den Leiter mit den Feldlinien des Dauermagnetfeldes, wodurch das Feld links vom Leiter wesentlich verstärkt wird. Der Leiter wird von den verstärkten Feldlinien in Richtung auf das geschwächte Feld zu nach rechts bewegt.

Nach dem Umdrehen des Magneten wurde auch die Richtung der Feldlinien umgekehrt. Der Strom fließt zwar wie in Abb. 55a 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 bewegt.

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.



(Abb. 56)

Da die Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld bei Motoren ausgenutzt wird, bezeichnet man die Linke-Hand-Regel auch als **Motor-Regel**.

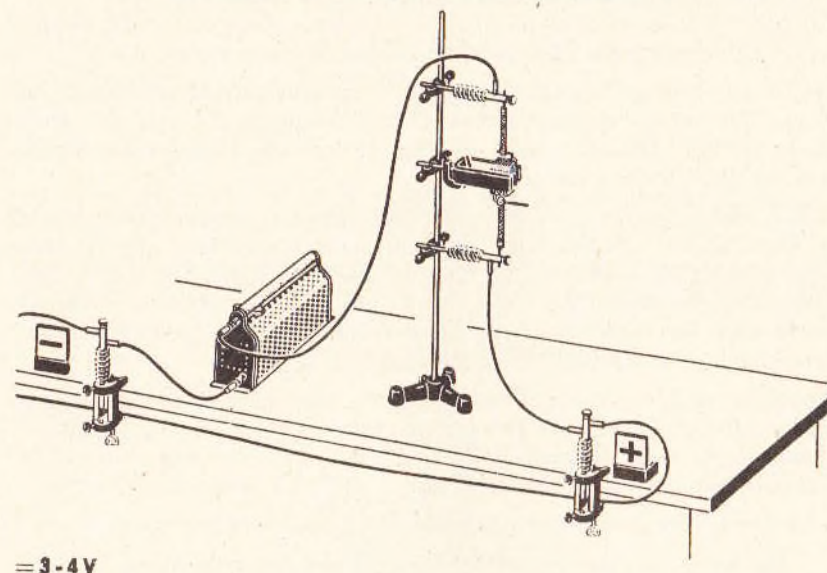
2.4.2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 57 wird eine Spule an beweglichen Metallbändern, die auch zur Stromzuführung dienen, in das Feld eines starken Hufeisenmagneten gehängt. Beim Schließen des Stromkreises wird in der Spule ein Magnetfeld erzeugt, dessen Richtung durch die Felder um die einzelnen Spulenleiter gegeben ist. Das Feld des Dauermagneten und das der Spule stehen zu Beginn des Versuches senkrecht zueinander (Abb. 58a); sie haben das Bestreben, sich in die gleiche

Wir stellen fest:

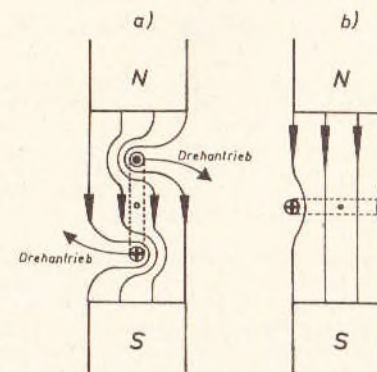
1. Eine stromdurchflossene Spule erhält im Feld eines Magneten einen Drehantrieb.
2. Die Richtung des Drehantriebs ist von der Stromrichtung in der Spule und von der Richtung des Magnetfeldes abhängig.

Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld



(Abb. 57)

Mit Hilfe der Abb. 58 soll der Vorgang erläutert werden. In der Spule wird beim Stromdurchgang ein Magnetfeld erzeugt, dessen Richtung durch die Felder um die einzelnen Spulenleiter gegeben ist. Das Feld des Dauermagneten und das der Spule stehen zu Beginn des Versuches senkrecht zueinander (Abb. 58a); sie haben das Bestreben, sich in die gleiche



(Abb. 58)

Richtung einzustellen (Magnetnadel im Erdkraftfeld). Die Spule (hier die Leiterschleife) wird sich deshalb rechtsherum drehen (Abb. 58b). Dieser Vorgang wird unter anderem bei elektrischen Meßwerken (Drehspulmeßwerk, dynamisches Meßwerk) und Elektromotoren ausgenutzt.

Der Drehantrieb ist so lange vorhanden, bis sich beide Magnetfelder in die gleiche Richtung eingestellt haben. Die Spule macht also nur eine Drehung um 90° . Danach bleibt sie stehen, weil die Ursache des Drehantriebs nicht mehr vorhanden ist.

Wollte man eine Drehung bis auf 360° erreichen, müßte man jeweils 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.

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**. (Näheres hierzu siehe im Teil 2 dieses Handbuchs.)

Nach den bisher gewonnenen Erkenntnissen können wir folgern:

Die Kraft, mit der eine stromdurchflossene Spule in einem Magnetfeld bewegt wird, ist um so größer, je größer die magnetische Induktion B , je größer die wirksame Leiterlänge und je höher die Stromstärke in der Spule ist.

In eine Formel gebracht, ergibt sich

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot 0,102 \quad \text{kp}$$

In dieser Formel bedeuten:

F = die Kraft in kp, mit der ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld abgelenkt wird,

B = magnetische Induktion in Tesla des äußeren Magnetfeldes,

l = wirksame Länge des Leiters in m,

I = Stromstärke im Leiter in A.

2.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.4.

1. Wovon ist der Bewegungsantrieb eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld abhängig? 2. Wie lautet die Linke-Hand-Regel? 3. Erläutern Sie den Drehantrieb einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld! 4. Von welchen Faktoren ist die Kraft abhängig, mit der eine stromdurchflossene Spule in einem Magnetfeld bewegt wird? 5. Für welche Zwecke macht man die Drehbewegung einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld nutzbar? 6. Was muß unternommen werden, um das ständige Weiterdrehen einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld zu erreichen?

3. Grundlagen der Wechselstromlehre

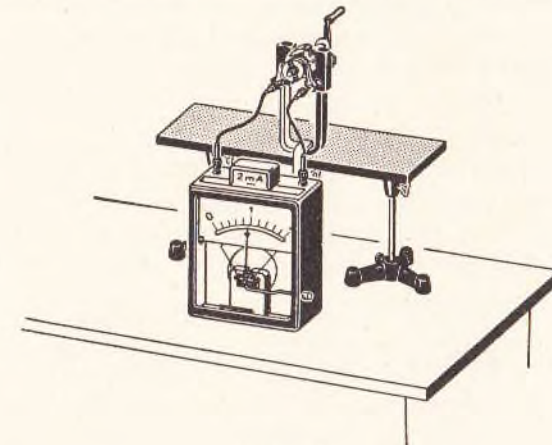
3.1. Die Entstehung des Wechselstromes

3.1.1. Die bewegte Spule im Magnetfeld

Im Abschnitt 2.2. haben wir festgestellt, daß in einem Leiter, der im Magnetfeld bewegt wird, eine Induktionsspannung erzeugt wird.

Der Versuch nach Abb. 59 soll uns zeigen, welche Wirkung ein zu einer Spule aufgewickelter Leiter zeigt, wenn die Spule in einem Magnetfeld gedreht wird.

Erzeugung einer Wechselspannung



(Abb. 59)

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 Milliampereometer 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:

Während der ersten halben Kurbelumdrehung schlägt das Milliampereometer 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 Wechselspannung) induziert.

3.1.1.1. Der Wechselstrom

Von dem Milliampereometer wurde ein Strom angezeigt, der bei der ersten halben Kurbelumdrehung eine andere Richtung hatte als bei der zweiten halben Umdrehung.

Einen Strom, der periodisch seine Richtung wechselt, bezeichnet man als Wechselstrom.

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

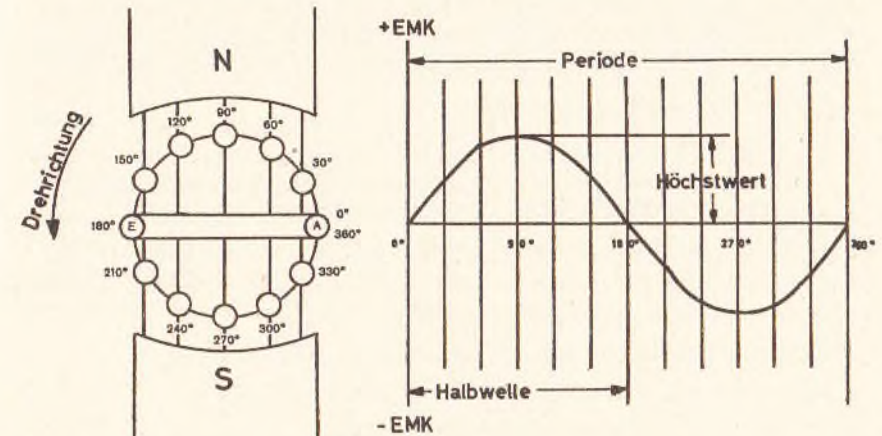
Die in einer Spule erzeugte Induktionsspannung verursacht einen Strom, der mit seinem Magnetfeld die Bewegung der Spule zu hemmen sucht.

3.1.2. Der Verlauf der Wechselspannung

In Abb. 60 ist der Verlauf der induzierten EMK aufgezeichnet. Es genügt zur Veranschaulichung die Darstellung einer Leiterschleife der Spule, deren Anfang A bei 0° und deren Ende E bei 180° 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° , ein halber von 180° und ein viertel von 90° . Für die bessere Übersichtlichkeit wurde eine Einteilung von 30° zu 30° gewählt. Der Kreisumfang von 360° wird nun auf einer Geraden abgewickelt, er entspricht der Strecke $U = d \cdot \pi$ (siehe „Handbuch der Fernmeldetechnik – Buchreihe Aft“, 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. 60, die damit den Verlauf der Wechselspannung veranschaulicht. Die Kurve heißt auf Grund mathematischer Zusammenhänge Sinuskurve (siehe Band B 1).

Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung



(Abb. 60)

Voraussetzung für die Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung ist die gleichmäßige Drehung einer Leiterschleife oder Spule in einem homogenen Magnetfeld.

3.1.2.1. Die Veränderung des magnetischen Flusses um den Leiter

Der Leiteranfang A befindet sich bei 0° noch im Ruhezustand, die induzierte Spannung ist gleich Null. Bei Beginn der Kreisbewegung wird der magnetische Fluß um den Leiter zeitlich so verändert, 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 Abschnitt 2.2. abhängig:

1. von der wirksamen Leiterlänge l (Windungszahl),
2. von der magnetischen Induktion B , die mit Hilfe des Erregerstromes (bei Elektromagneten) vergrößert oder verringert werden kann,
3. von der Geschwindigkeit v der Leiterbewegung, in unserem Fall also von der Schnelligkeit, mit der der magnetische Fluß um den Leiter sich ändert.

Der Umfang der Flußänderung ist trotz der gleichbleibenden Geschwindigkeit der Spule nicht an allen Punkten gleich groß.

Verfolgen wir den Weg des Leiters in Abb. 60. Von 0° bis 30° verläuft der Weg spitz zu den Feldlinien, der magnetische Fluß wird nur sehr geringfügig geändert. Von 60° bis 90° verläuft der Weg fast rechtwinklig zu den Feldlinien, im Punkt 90° sogar genau rechtwinklig. Dadurch erfolgt hier die größtmögliche Veränderung des magnetischen Flusses um den Leiter.

Aus dieser Erkenntnis ergibt sich:

1. In den Punkten 0° , 180° und 360° bewegt sich der Leiter parallel zu den Feldlinien, der magnetische Fluß wird nicht verändert, damit ist die induzierte EMK gleich Null.
2. In den Punkten 90° und 270° erfolgt die größtmögliche Veränderung des magnetischen Flusses, die Induktionsspannung erreicht hier ihren höchsten Wert.

Die Richtung der erzeugten Induktionsspannung hängt davon ab, ob

- a) der magnetische Fluß in der Leiterschleife zu- oder abnimmt und
- b) sich die Richtung des magnetischen Flusses ändert.

Bei der Stellung 90° der Leiterschleife findet gleichzeitig ein Übergang von Abnahme auf Zunahme des magnetischen Flusses sowie eine Umkehrung der Flußrichtung in der Spule statt. Aus diesem Grunde erfolgt bei 90° keine Änderung der Spannungsrichtung (beide Einflüsse heben sich gegeneinander auf).

3.1.3. Die Periode und die Frequenz

Aus dem Spannungsverlauf nach Abb. 60 ist zu erkennen, daß bei der Umdrehung der Spule eine positive und eine negative Spannungs-Halbwellen entsteht. **Die beiden Halbwellen ergeben zusammen eine Periode.** Die Anzahl der Perioden in der Sekunde bezeichnet man als **Frequenz f** , sie wird in Hertz¹⁾ Hz gemessen:

Die Frequenz f ist die Anzahl der Perioden während einer Sekunde und wird in Hertz angegeben. Als Einheit gilt $\frac{1}{s}$.

Der Wert 1 Hertz ist sehr klein. Man rechnet deshalb mit Kilohertz (1 kHz = 1000 Hz) und Megahertz (1 Mhz = 1 000 000 Hz).

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

3.1.3.1. Die Frequenz abhängig von der Anzahl der Polpaare

Wenn wir in unserer Versuchsanordnung nach Abb. 59 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.

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

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad \begin{matrix} n \text{ in } \frac{U}{\text{min}} \\ f \text{ in } \frac{1}{s} \text{ (Hz)} \end{matrix}$$

Aus dieser Formel läßt sich durch Umstellung die Frequenz f zu

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \text{ (Hz)}$$

und die Zahl der Polpaare zu

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

errechnen.

3.1.4. 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 daß 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 Wirkung (z. B. Wärmewirkung) hervorrufen würde wie der Wechselstrom. Eine 220-Volt-Glühlampe kann

¹⁾ Heinrich Hertz, deutscher Physiker, 1857–1894.

genauso gut an Gleich- wie an Wechselstrom angeschlossen werden und hat bei beiden Stromarten den gleichen Effekt (Effekt = Wirkung). Die Leistung des Gleichstroms errechnet sich zu $P = I^2 \cdot R$, sie entspricht damit dem Quadrat des Stromwertes¹⁾. Ebenso muß der effektgleiche, der **Effektivwert** des Wechselstromes, ein quadratischer Mittelwert der gesamten Stromkurve sein.

Unter dem Effektivwert versteht man den Wert der Wechselspannung oder des Wechselstroms, der die gleiche Wirkung wie ein gleich großer Wert einer konstanten Gleichspannung oder eines konstanten Gleichstroms aufweist.

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

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

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

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

daraus folgt

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

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

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

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

Ebenso ergibt sich der Wert für die Spannung:

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

Diese Beziehungen gelten jedoch nur für sinusförmigen Wechselstrom bzw. für sinusförmige Wechselspannung!

¹⁾ Zur Ableitung des Effektivwertes siehe auch unter 4.3.1.

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: U_{max}

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

2. Beispiel:

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

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

Gesucht: I_{eff}

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

3.1.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.1.

1. Zeichnen Sie die Entstehung einer Wechselspannung auf! 2. Von welchen Faktoren hängen Größe und Richtung der Wechselspannung bei ihrer Erzeugung durch Drehen einer Leiterschleife im Magnetfeld ab? 3. Was versteht man unter der Frequenz eines Wechselstromes? 4. Welche Frequenz hat der technische Wechselstrom in Deutschland? 5. Was ist Voraussetzung für die Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung? 6. Wieviel Polpaare muß ein Wechselstromgenerator haben, der 50 Hz erzeugen soll und mit einer Drehzahl von 600 U/min arbeitet? 7. Was versteht man unter dem Begriff Effektivwert der Wechselspannung oder des Wechselstroms? 8. Wie groß sind die Effektivwerte, wenn in einem Stromkreis die Höchstwerte mit 311 Volt und 2,7 Ampere gemessen worden sind? 9. Wie groß ist der Maximalwert der Steuerspannung einer Verstärkerröhre, wenn an das Gitter eine Wechselspannung von 2,5 Volt gelegt wird? 10. An einer Wechselspannung von 250 V soll ein Kondensator betrieben werden. Welche Spannungsfestigkeit muß er mindestens besitzen?

3.2. Wechselstromwiderstände

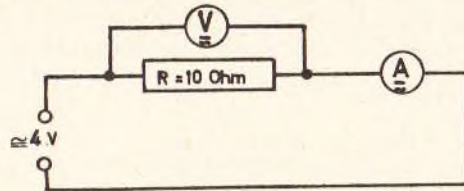
3.2.1. Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis

Wir wollen in einem Versuch nach dem Schema der Abb. 61 einen ohmschen Widerstand in einem Gleich- und einem Wechselstromkreis untersuchen. Bei Anlegen einer Gleichspannung von 4 Volt stellt sich 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 $R = 10 \text{ Ohm}$.

Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis



(Abb. 61)

Damit haben wir festgestellt:

Der rein ohmsche Widerstand 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 angeschaltet wird? Wie groß ist der durch die Glühlampe fließende Strom?

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

Gesucht: I ; R

Lösung: $P = U \cdot I$

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

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

3.2.2. Die Spule im Wechselstromkreis

Das Schema des Versuchs nach Abb. 62 ist das gleiche wie in der Abb. 61. Den ohmschen Widerstand haben wir natürlich gegen eine Spule mit 1200 Windungen ausgetauscht und den Meßbereich des Voltmeters erweitert. Als anzulegende Spannung wählen wir 12 Volt. Die Ergebnisse fassen wir zusammen:

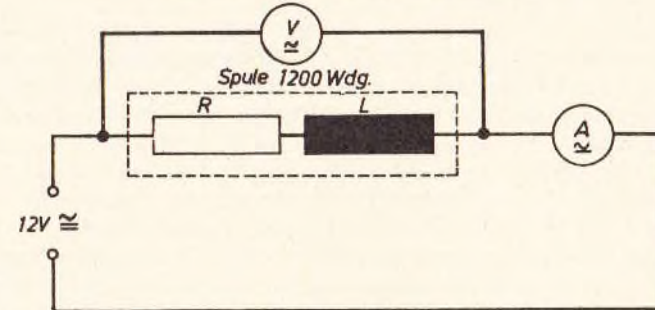
1. Gleichstrom:

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

2. Wechselstrom, Spule ohne Eisenkern:

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

Die Spule im Wechselstromkreis



(Abb. 62)

3. Wechselstrom, Spule mit Eisenkern:

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

Aus der Zusammenstellung ersehen wir:

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

3.2.2.1. Wirk-, Schein- und Blindwiderstand (R , Z , X)

Der Gleichstromwiderstand der Spule ist gleich dem ohmschen Widerstand des Spulendrahtes. 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 es sich aus den Messungen des Versuchs ergibt (Z unter 2.) = $18,8 \Omega$ (Z unter 3.) = $66,7 \Omega$. Nach unseren Erkenntnissen über die Selbstinduktion wird mit steigender Induktivität der Stromdurchfluß durch die Spule geringer. Bei der Berechnung des Spulenwiderstandes nach dem Ohmschen Gesetz (mit den Werten für die Spannung und den Strom aus dem Versuch) ist der Widerstand der Spule im Wechselstromkreis größer geworden. Da der ohmsche Widerstand des Spulendrahtes jedoch festliegt, muß in dem er-

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

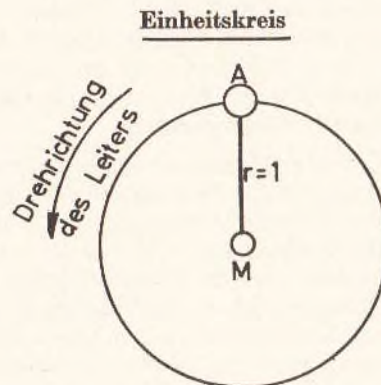
Diesen von der Induktivität abhängigen Widerstand nennt man deshalb auch **induktiven Widerstand** oder **Blindwiderstand**. Seine Größe ist außer von der Induktivität auch noch von der Frequenz des Wechselstromes abhängig. Würde man beim Versuch nach Abb. 62 die Netzfrequenz von 50 auf 100 Hz erhöhen, so würde auch der induktive Widerstand doppelt so groß werden. Bei der doppelten Frequenz geht nämlich die Stromänderung in der Zeiteinheit in der Spule auch doppelt so schnell vor sich. Damit wird die in der Spule erzeugte Selbstinduktionsspannung aber auch doppelt so hoch. Nach der Lenzschen Regel ist aber die Selbstinduktionsspannung der angelegten Spannung entgegengerichtet. Die Selbstinduktionsspannung setzt somit den Stromfluß herab. Sie vergrößert also den Widerstand.

Für den induktiven Widerstand X_L gilt also:

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

3.2.2.2. Die Kreisfrequenz

In Abb. 60 ist die Frequenz des Wechselstromes durch die Bewegung einer Leiterschleife auf einem Kreisumfang dargestellt worden. Dabei legt der Leiter bei einer Umdrehung von 360° 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 je Sekunde wird der zurückgelegte Weg doppelt so lang, $U = 2 \pi \cdot 2$;



(Abb. 63)

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 ω (omega). **Die Kreisfrequenz ist also:**

$$\omega = 2 \pi \cdot f \quad \frac{1}{s}$$

Beispiel:

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

Gegeben: $f = 50$ Hz

Gesucht: ω

Lösung: $\omega = 2 \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = \underline{\underline{314 \frac{1}{s}}}$

3.2.2.3. 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:

$$X_L = 2 \pi f \cdot L \quad \Omega$$

X_L ergibt sich in Ohm, wenn L in Henry und f in Hertz eingesetzt werden. Die Richtigkeit der Formel läßt sich leicht beweisen, wenn man die entsprechenden Maßeinheiten einsetzt:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L &= X_L \\ - \cdot - \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} &= \frac{V}{A} = \Omega \end{aligned}$$

Der Quotient $\frac{V}{A}$ ergibt nach dem Ohmschen Gesetz den Widerstand in Ohm.

1. Beispiel:

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

Gegeben: $L = 0,08$ H; $f = 50$ Hz

Gesucht: X_L

Lösung: $X_L = 2 \pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,08 = \underline{\underline{25,1 \Omega}}$

2. Beispiel:

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

Gegeben: $X_L = 34,54 \text{ } \Omega$; $f = 1000 \text{ Hz}$

Gesucht: L

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

3. Beispiel:

Bei welcher Frequenz hat eine Spule von 350 mH einen induktiven Widerstand von 110 Ohm ?

Gegeben: $L = 0,35 \text{ H}$; $X_L = 110 \text{ } \Omega$

Gesucht: f

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

3.2.2.4. Die Drosselspule

Der Wirkwiderstand einer Spule bewirkt eine Erwärmung und damit einen Energieverlust. Der induktive Widerstand dagegen hat keine äußere Verlustwirkung. Durch den fließenden Strom wird an der Induktivität einer Spule keine Verlustwärme erzeugt. Der Strom wird durch den entgegenwirkenden Selbstinduktionsstrom der Induktivität herabgesetzt. Der Strom 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 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 unter anderem vom magnetischen Widerstand in der Spule abhängig. Die Induktivität und der induktive Widerstand einer Drosselspule werden dadurch verkleinert, daß man mit Hilfe eines Luftspalts im Eisenkreis der Spule den magnetischen Widerstand erhöht und damit den magnetischen Fluß schwächt. Wir erkennen:

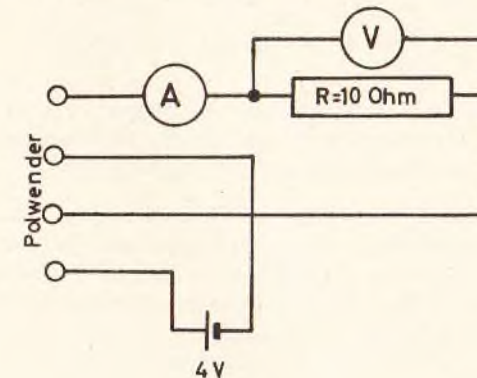
Der induktive Widerstand ist um so kleiner, je größer der Luftspalt ist.

Da der Luftspalt im Eisenkern den magnetischen Widerstand erhöht, wird durch ihn eine u. U. mögliche magnetische Sättigung des Eisenkerns verhindert (wichtig bei Anwendung in Stromkreisen mit schwankendem Gleichstrom).

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 Aus-sieben niedriger Frequenzen, in Siebschaltungen hinter Netzgleichrichtern und als Vergleichsinduktivität für Meßzwecke.

3.2.2.5. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

Wir wollen zunächst untersuchen, wie sich Strom und Spannung an einem rein ohmschen Widerstand verhalten. Wir bedienen uns dabei des Versuchs nach Abb. 64.

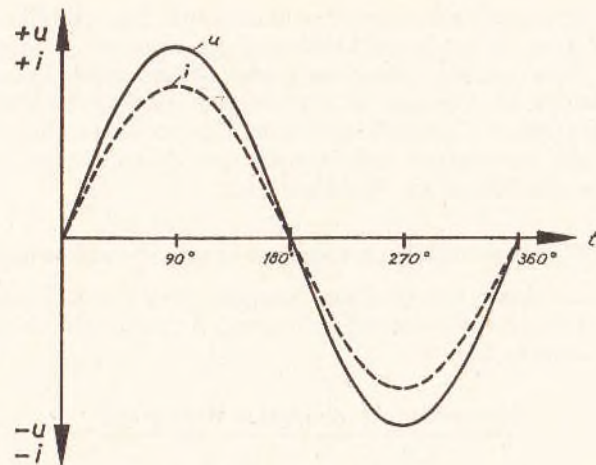
Phasenlage am ohmschen Widerstand

(Abb. 64)

An einen Polwender legen wir einmal eine Gleichspannung von 4 Volt und zum anderen einen Festwiderstand von $10 \text{ } \Omega$, 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° . Während einer Umdrehung ergibt sich also eine Spannungskurve ähnl. Abb. 60.

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 Ausschlag 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. 65.



(Abb. 65)

Wir erkennen, abgesehen von den Höchstwerten, den gleichen Verlauf beider Kurven; man sagt, sie haben die gleiche Phasenlage. Aus der Abb. 65 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, d. h. Nulldurchgänge und Maximalwerte werden von Strom und Spannung zur gleichen Zeit erreicht.

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 verhältnismäßig schnell den vollen Spannungswert bzw. den Nullwert anzeigt, während der Höchstwert bzw. der Nullwert des Stromes erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird.

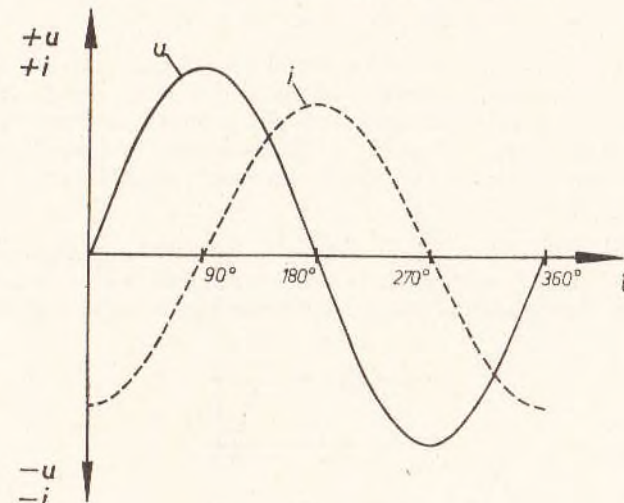
Aus diesem Vorgang können wir ableiten:

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. 65 schon gehabt haben. Der Strom hat seinen Nullwert erst nach einer Vierteldrehung des Polwenders erreicht, deshalb müssen wir seinen Nulldurchgang um 90° nach rechts verlegen. Ebenso ist der Höchstwert des Stroms um 90° nach rechts zu verlegen. Aus den beiden Kurven nach

Abb. 66 ist zu erkennen, daß der Strom und die Spannung nicht mehr die gleiche Phasenlage haben, sondern daß sich die Phasenlage um 90° verschoben hat.

Phasenlage am induktiven Widerstand



(Abb. 66)

Bei einem rein induktiven Widerstand in einem Wechselstromkreis tritt infolge der Nacheilung des Stromes gegen die Spannung eine Phasenverschiebung von 90° 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 verringert, während der Wirkwiderstand gleichgeblieben 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° und 90° haben. **Der Phasenwinkel muß jedoch immer kleiner als 90° sein, weil jede Spule neben dem induktiven einen**

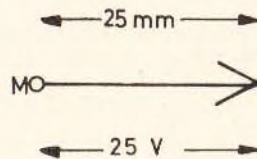
Wirkwiderstand hat. Der Winkel der Phasenverschiebung oder kurz Phasenwinkel wird mit dem griechischen Buchstaben φ (sprich phi) bezeichnet.

3.2.2.6. Die Berechnung der Widerstandswerte einer Spule

3.2.2.6.1. 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 dem Betrag der Strom- und Spannungswerte entsprechend in einem bestimmten Maßstab aufzutragen. Sollen z. B. 25 V als Zeiger dargestellt werden, so entsprechen, wie in Abb. 59 gezeigt, bei einem Maßstab von 1 mm für 1 V, 25 mm gleich 25 V.

Eine physikalische Größe, die durch Betrag und Richtung gekennzeichnet ist, wird als Vektor bezeichnet und als Zeiger dargestellt, dessen Länge ein Maß für den Betrag ist und dessen Pfeilspitze die Richtung angibt.



(Abb. 67)

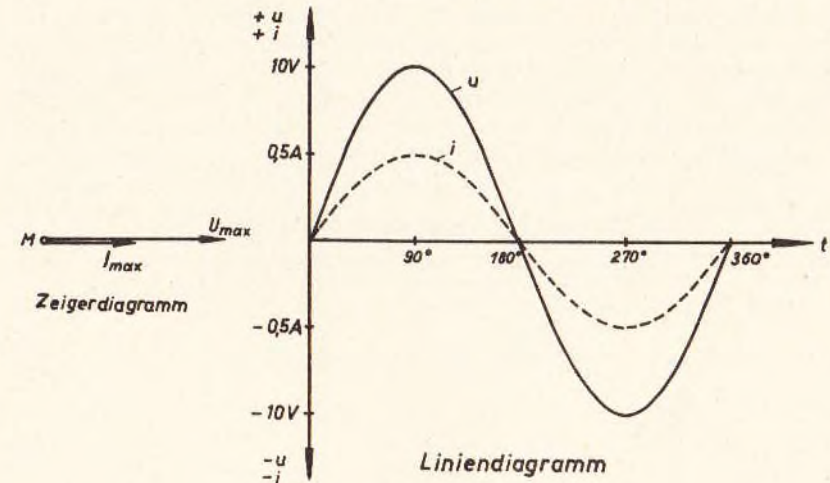
Grundsätzlich ist festgelegt, den Zeiger um den Mittelpunkt M links herum kreisen zu lassen (siehe auch Abb. 63). Dabei erhält man durch die Abwicklung des Weges, den der Pfeil zurücklegt ($U = d \cdot \pi$), auf einer Geraden wiederum die Wechselspannungskurve nach der Abb. 60.

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 links herum drehen, so erhält man bei Abwicklung der Zeigerwege die in Phase liegenden Kurven nach Abb. 68. Wir wählen einen Maßstab von 1 cm $\triangleq$ 4 V und 1 cm $\triangleq$ 0,4 A, und wir legen dem Diagramm die Werte $U_{\max} = 0,5$ A zugrunde (Abb. 68).

Bei **rein induktivem Widerstand** (unter Vernachlässigung des der Spule zugehörigen Wirkwiderstandes) eilt die Spannung dem Strom um 90° voraus. Der Spannungszeiger muß also 90° vor dem Stromzeiger liegen, er bildet einen Winkel von 90° zum Stromzeiger. Lassen wir nun wiederum beide Zeiger links herum laufen, so muß sich ein Liniendiagramm nach Abb. 69 ergeben; wir haben zwischen der Strom- und der Spannungs-

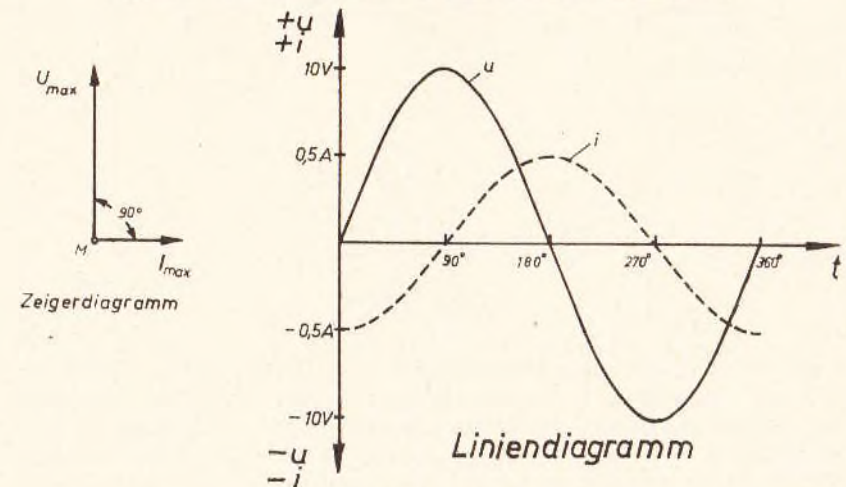
kurve eine Phasenverschiebung von 90° . Für unsere Zeichnung nach Abb. 69 wählen wir die gleichen Werte und den gleichen Maßstab wie für die vorherigen Diagramme.

Spannung und Strom an einem Wirkwiderstand



(Abb. 68)

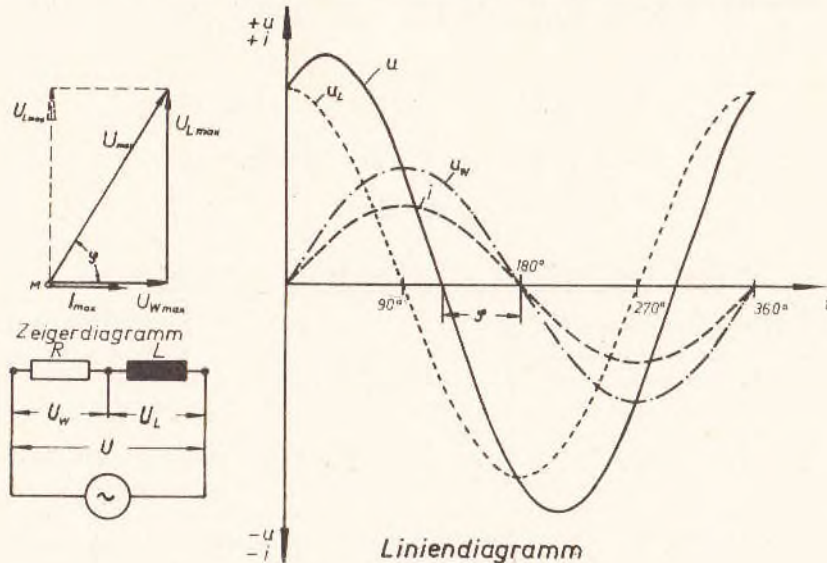
Spannung und Strom an einem induktiven Widerstand



(Abb. 69)

Berücksichtigen wir jetzt bei einer Spule den **Wirkwiderstand** und den **Blindwiderstand der Induktivität**. Trägt man die Wirkspannung (in Phase mit dem Strom) waagerecht und die Spannung am induktiven Widerstand = Blindspannung (90° vorausschlagend) senkrecht vom Punkt M aus ab, so ergibt sich die Gesamtspannung als Diagonale eines aus Wirkspannung und Blindspannung konstruierten Parallelogramms. Um das Ergänzen des Zeigerdiagramms zu einem Parallelogramm einzusparen, zeichnet man das Zeigerdiagramm im allgemeinen so, daß man aus den einzelnen Größen direkt das Ergebnis ermitteln kann. Im Zeigerdiagramm werden Vektoren unter Berücksichtigung von Betrag und Richtung addiert. Zeichnerisch bedeutet das, daß die Strecken (= Maßstab für den Betrag) ihrer Richtung entsprechend aneinandergesetzt werden: An das Ende der

Spannung und Strom an einer Reihenschaltung Wirkwiderstand - induktiver Widerstand



(Abb. 70)

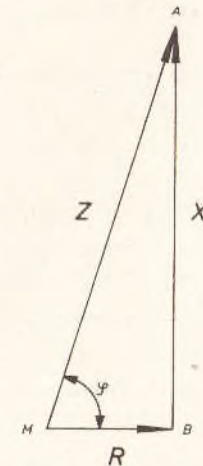
ersten Strecke wird die nächste gesetzt usw. Man beginnt dabei immer mit der Wirkgröße (z. B. Wirkspannung). In der Abb. 70 wird dieses Verfahren veranschaulicht. Am Wirkwiderstand fällt die Spannung U_W und am induktiven Widerstand die Spannung U_L ab. U_W und der Strom I sind in Phase, dagegen ist U_L um 90° vorausschlagend verschoben. Beide Widerstände zusammen bilden den Scheinwiderstand, an dem die Ge-

samtspannung (auch Scheinspannung genannt) U abfällt. Die Scheinspannung ergibt sich als Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks, das wir aus U_W und U_L bilden können. Die Phasenverschiebung φ zwischen Gesamtspannung und Strom, die durch den induktiven Widerstand der Spule verursacht wird, liegt zwischen der Wirkspannung U_W (bzw. dem Strom I) und der Gesamtspannung U .

Für unser Zeiger- und Liniendiagramm wählen wir die Werte $I_{\max} = 0,5 \text{ A}$; $U_{W\max} = 6 \text{ V}$ und $U_{L\max} = 10 \text{ V}$. Als Maßstab wählen wir $1 \text{ cm} \approx 4 \text{ V}$ und $1 \text{ cm} \approx 0,5 \text{ A}$. Wir erhalten dann die Diagramme nach Abb. 70. Den Wert für U können wir durch Abmessen der Strecke in der Zeichnung ermitteln, es ergibt sich eine Länge von $29 \text{ mm} = 11,6 \text{ V}$. Den Phasenwinkel können wir mit dem Winkelmesser messen, wir erhalten $\varphi = 60^\circ$.

Wir wollen nun ein Zeigerdiagramm für die Wechselstromwiderstände einer Spule aufzeichnen (Abb. 71). Wir können die Zeiger in der gleichen Weise anwenden, wie bei den Spannungsdiagrammen. Denn die Spannungen U_W , U_L und U fallen ja an den entsprechenden Widerständen ab. Wir wählen die Werte $R = 18 \Omega$ und $X_L = 54 \Omega$. Der Maßstab soll $1 \text{ cm} \approx 10 \Omega$ betragen. Nachdem wir aus R und X_L das Parallelogramm konstruiert haben, können wir den Wert für Z ablesen und erhalten $Z = 57 \Omega$. Den Phasenwinkel φ messen wir mit dem Winkelmesser zu $\varphi = 72^\circ$.

Zeigerdiagramm für die Widerstände



(Abb. 71)

Das Zeigerdiagramm für die Widerstände läßt sich aus dem Zeigerdiagramm für die Spannungen herleiten. Da der Strom in einer Reihenschaltung überall gleich groß ist, brauchen wir nur alle Spannungen durch den gleichen Strom zu dividieren, um auf die Widerstände zu kommen:

$$\frac{U}{I} = Z; \quad \frac{U_W}{I} = R; \quad \frac{U_L}{I} = X_L.$$

Wenn aber der Strom überall gleich groß ist, dann müssen die Widerstände im gleichen Verhältnis zueinander stehen wie die Spannungen.

Die Zeigerdiagramme für die Spannungen und für die Widerstände einer Reihenschaltung stimmen daher in den Winkeln überein (ähnliche Dreiecke!).

3.2.2.6.2. Rechnerische Bestimmung

Eine rechnerische Bestimmung der Widerstände können wir mit Hilfe des Dreiecks M-A-B der Abb. 71 durchführen. Dieses Dreieck hat bei B einen rechten Winkel (90°). 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

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

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

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad \Omega$$

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

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad \Omega$$

und für den Wirkwiderstand:

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} \quad \Omega$$

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

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Haben wir einen Wirkwiderstand, so ist $Z = R$ 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 $Z = X_L$ und damit $R = 0$. 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° liegen alle vorkommenden Werte von $\cos \varphi$ und φ .

1. Beispiel:

$R = 18 \Omega$; $X = 54 \Omega$ (Das sind die Werte aus dem Diagramm)

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = \sqrt{54^2 + 18^2} = \sqrt{3240} = \underline{\underline{56,9 \Omega}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{18}{56,9} = 0,316; \text{ aus der Tabelle ergibt sich } \varphi = \underline{\underline{71,6^\circ}}$$

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

Gesucht: X_L ; Z ; I

Lösung: $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1 = \underline{\underline{31,4 \Omega}}$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{9^2 + 31,4^2} = \sqrt{1067} = \underline{\underline{32,7 \Omega}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{9}{32,7} = 0,275$$

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

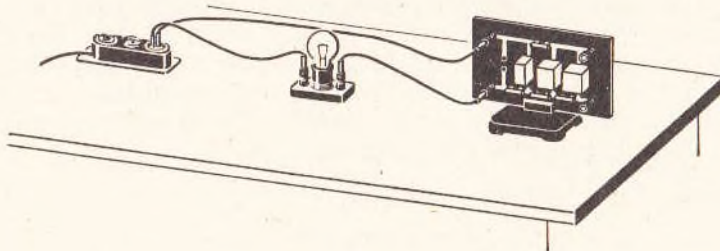
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{85}{32,7} = \underline{\underline{2,6 \text{ A}}}$$

3.2.3. Der Kondensator im Wechselstromkreis¹⁾

Wir wollen bei dem Versuch nach Abb. 72 eine Glühlampe nacheinander mit Kondensatoren von 2, 4, 6, 8 und 10 μF in Reihe an das Lichtnetz (220 V) anschließen. Die Glühlampe leuchtet zunächst dunkler als normal. Bei Erhöhung der Kapazität wird das Leuchten zunehmend heller.

¹⁾ Über den Kondensator im Gleichstromkreis siehe Band B 3.

Abhängigkeit des kapazitiven Widerstands von der Größe der Kapazität



(Abb. 72)

Wir können aus diesem Vorgang erkennen:

Der Kondensator läßt Wechselstrom fließen. Der Strom steigt mit zunehmender Kapazität. Der Wechselstromwiderstand X_C eines Kondensators sinkt mit steigender Kapazität. Den Wechselstromwiderstand eines Kondensators nennt man kapazitiven Blindwiderstand. Er steht zur Kapazität im umgekehrten Verhältnis:

$$X_C \sim \frac{1}{C}$$

3.2.3.1. Kapazitiver Widerstand und Frequenz

Der Versuch nach Abb. 73 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 Gleichspannung anlegen, blitzt die Glühlampe kurz auf und erlischt dann gleich wieder.

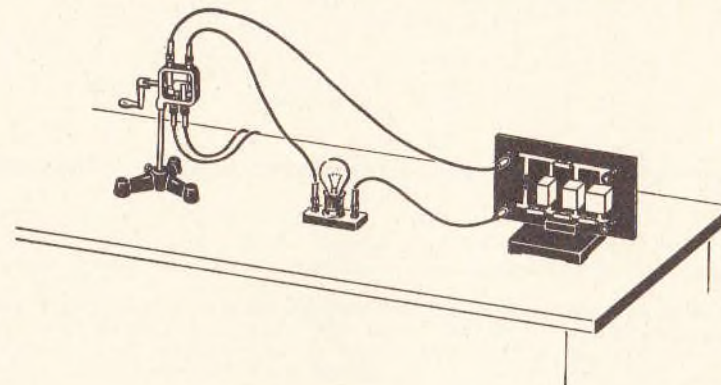
Wir stellen fest:

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.**

Abhängigkeit des kapazitiven Widerstands von der Frequenz



(Abb. 73)

Somit verhält sich der kapazitive Widerstand X_C umgekehrt wie die Frequenz f . In die Formel zur Errechnung des kapazitiven Widerstandes ist natürlich die Kreisfrequenz einzusetzen:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \Omega$$

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

Das Verhalten einer Kapazität an Wechselspannung läßt sich wie folgt erklären:

Beim Verändern der Spannung an den Belägen der Kapazität findet eine dielektrische Verschiebung statt. Es fließt ein sog. Verschiebungsstrom.

Man hat festgelegt:

Ein Kondensator hat die Kapazität 1 Farad, wenn über ihn bei gleichmäßiger Änderung der Spannung um 1 Volt in 1 Sekunde ein Verschiebungsstrom von 1 Ampere fließt.

An Stelle der Maßeinheit Farad kann man daher auch die Maßeinheit $\frac{A \cdot s}{V}$ einsetzen. Die Richtigkeit der Formel für die Berechnung des kapazitiven Blindwiderstands kann wiederum leicht bewiesen werden, wenn man die entsprechenden Maßeinheiten einsetzt:

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

$$\frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{A \cdot s}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Der Quotient $\frac{V}{A}$ ergibt nach dem Ohmschen Gesetz den Widerstand in Ohm.

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: X_C

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

$$X_C = \frac{1}{0,001256} = \frac{1\,000\,000}{1\,256} = \underline{\underline{796,2 \Omega}}$$

2. Beispiel:

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

Gegeben: $X_C = 6\,400 \Omega$; $f = 10\,000 \text{ Hz}$

Gesucht: C

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

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{6,28 \cdot 10\,000 \cdot 6\,400}$$

$$C = \frac{1}{391\,920\,000} = \underline{\underline{0,000000002552 \text{ F}}}$$

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

3. Beispiel:

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

Gegeben: $C = 0,000080 \text{ F}$; $X_C = 40 \Omega$

Gesucht: f

Lösung: Wir erhalten wiederum nach Umstellen der Grundformel:

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

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

3.2.3.2. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

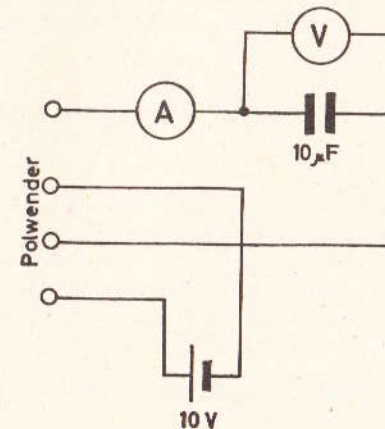
Wir wollen jetzt in der Weise, wie wir es in Abb. 64 mit einem rein ohmschen und einem rein induktiven Widerstand bereits getan haben, nach dem Schema der Abb. 74 die Phasenverschiebung bei einem rein kapazitiven Widerstand untersuchen.

Wir drehen auch hier den Polwender langsam durch und beobachten dabei beide Meßinstrumente auf die zeitliche Folge ihrer Zeigerausschläge. 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.

Die Phasenverschiebung durch eine Kapazität



(Abb. 74)

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° entspricht, macht eine Vierteldrehung 90° aus.

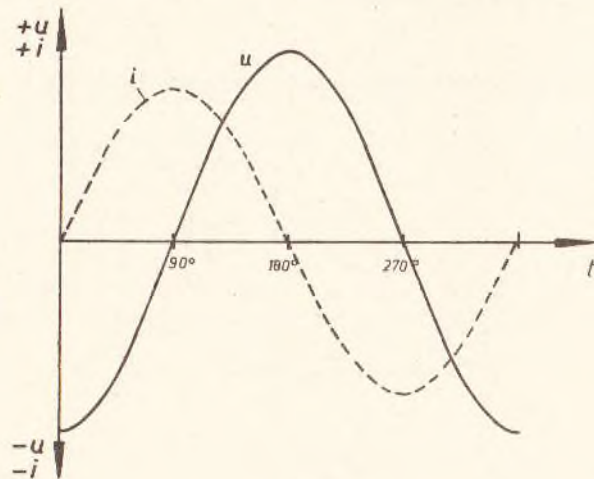
Aus unserer Beobachtung können wir folgern:

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

3.2.3.3. Liniendiagramm für Spannung und Strom an einer Kapazität

Ein Kondensator hat einen kaum feststellbaren sehr hohen Wirkwiderstand. Deshalb kann man ihn vernachlässigen und jeden Kondensator als einen rein kapazitiven Widerstand behandeln, dessen Phasenwinkel φ immer 90° beträgt. Dabei ist $\cos \varphi$ immer gleich Null. Abb. 75 zeigt das Liniendiagramm für Strom und Spannung an einem rein kapazitiven Widerstand.

Phasenlage am kapazitiven Widerstand



(Abb. 75)

Beim Kondensator ist also der Scheinwiderstand fast immer gleich dem kapazitiven Widerstand ($Z = X_C$). 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 frequenzun-**

abhängig 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 verursachen eine Phasenverschiebung, die einander entgegengerichtet ist.

3.2.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.2.

1. Wie verhält sich ein rein ohmscher Widerstand in einem Gleich- und in einem Wechselstromkreis? 2. Warum unterscheidet man bei Glühlampen nicht nach solchen für Gleich- und Wechselstrom? 3. Welche Widerstände hat eine Spule im Wechselstromkreis? 4. Erklären Sie den Begriff „Induktiver Widerstand“! 5. Was versteht man unter Kreisfrequenz? 6. Wie lautet die Formel zur Errechnung des induktiven Widerstandes? 7. Wie groß ist der induktive Widerstand einer Spule mit der Induktivität 20 mH bei einer Frequenz von 1000 Hz? 8. Welche Aufgabe hat der Luftspalt bei einer Drosselspule? 9. Wie verhalten sich Strom und Spannung bei einer Spule im Wechselstromkreis? 10. Ermitteln Sie mit Hilfe eines Zeigerdiagrammes den Scheinwiderstand und den Phasenwinkel einer Drosselspule, deren Wirkwiderstand 50 Ohm und deren induktiver Widerstand 150 Ohm beträgt! 11. Lösen Sie die vorhergehende Aufgabe auf rechnerischem Wege! 12. Wie verhält sich ein Kondensator im Gleichstromkreis? 13. Wie verhalten sich Strom und Spannung bei einem Kondensator im Wechselstromkreis? 14. Wie wirkt sich die Frequenz des Wechselstromes auf den Kondensator aus? 15. Wie groß ist der kapazitive Widerstand eines Kondensators von $12 \mu F$ bei einer Frequenz von 50 Hz? 16. Ein Kondensator soll bei einer Frequenz von 2 kHz einen kapazitiven Widerstand von rd. 250 Ohm haben. Wie groß muß seine Kapazität sein? 17. In welchem Verhältnis stehen Schein- und kapazitiver Widerstand beim Kondensator? 18. Ist die Phasenverschiebung bei einer Spule die gleiche wie bei einem Kondensator? Erklären Sie die Zusammenhänge!

3.3. Der Mehrphasenwechselstrom

3.3.1. Der Drehstrom

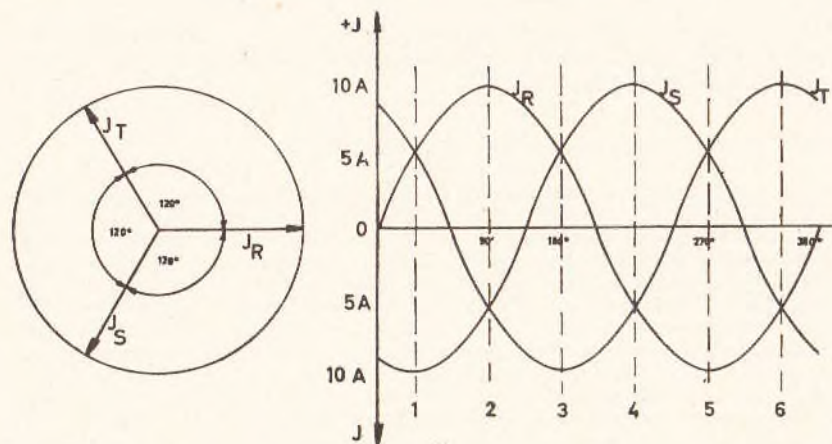
Werden zur Erzeugung eines Wechselstromes in einem Wechselstromgenerator nicht nur eine, sondern drei Spulen angebracht, die im Winkel von 120° versetzt angeordnet sind, so erhält man in jeder der drei Spulen einen Wechselstrom (siehe hierzu unter 1.1.4. im Teil 2 dieses Handbuchs). An jeder Spule entsteht 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. 77 zum Verbraucher leiten. Diese Art ist jedoch noch kein Vorteil gegenüber dem einfachen Wechselstrom.

Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom)



(Abb. 76)

Aus der Abb. 76 können wir erkennen, daß die drei erzeugten Wechselströme nicht in Phase liegen, sondern daß sie in ihrer Phase um genau 120° verschoben sind. Zuerst wird in der Spule U - X der Höchstwert von Strom und Spannung erzeugt, nach einer Drittel-Drehung (120°) in der Spule V - Y und nach weiteren 120° 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

Wenn wir den Stromhöchstwert, wie in Abb. 76 aufgetragen, mit 10 Ampere annehmen, ergibt sich für die Punkte 1 bis 6 der Abb. 76 jeweils folgender **Summenstrom**:

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

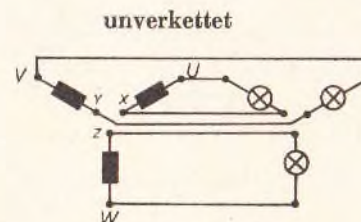
$$\text{Pkt 2: } I_R = + 10 \text{ A, } I_S = - 5 \text{ A, } I_T = - 5 \text{ A, Summe} = 0 \text{ A}$$

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. 77 zusammenlegen. In dieser Leitung würde kein Strom fließen, vorausgesetzt, daß die Stromwerte in den drei Spulenkreisen gleich groß sind. Man könnte noch einen

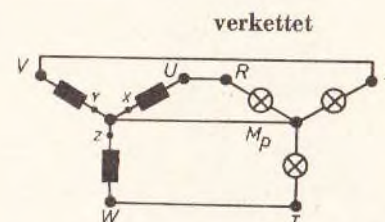
Schritt weitergehen und den einzelnen Rückleiter auch noch fortlassen und statt dessen die Spulenenden X - Y - Z einfach miteinander verbinden.

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. 78). Sie sind sinngemäß den drei Spulenanschlüssen U - V - W zugeordnet.

3-Phasenwechselstrom



(Abb. 77)



(Abb. 78)

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.

Drehstrom ist ein Dreiphasen-Wechselstrom, dessen drei Ströme bzw. drei Spannungen um je 120° gegeneinander phasenverschoben sind.

Unter der Voraussetzung, daß alle drei Stromkreise gleich belastet sind, ist beim Drehstrom die Summe aller drei Spannungen sowie die Summe aller drei Ströme in jedem Augenblick gleich Null.

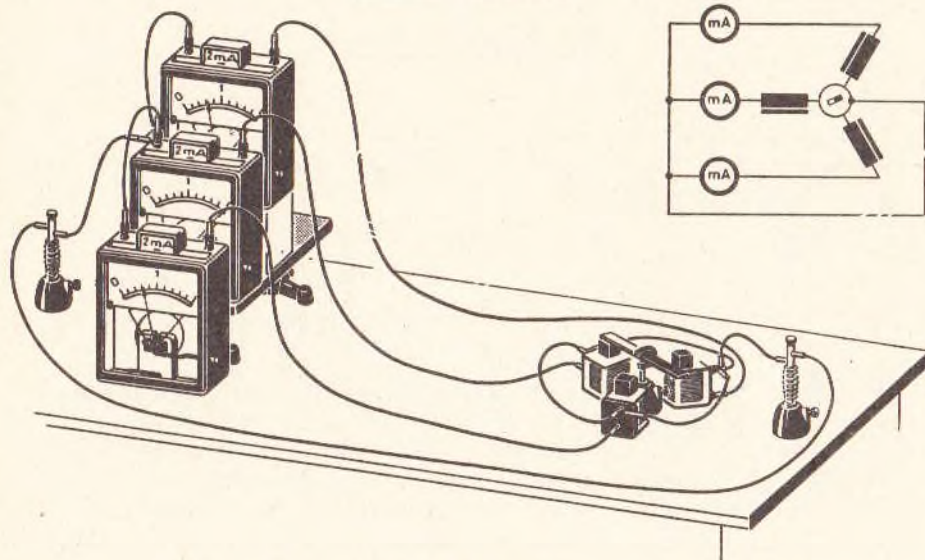
Diese Eigenschaft des Drehstroms ermöglicht die Verkettung des Drehstromnetzes, so daß man zur Fortleitung von drei Wechselströmen an Stelle von sechs mit nur drei Leitern (bzw. vier einschließlich Mp) auskommt. Das bedingt eine große Einsparung. Daher werden fast alle Versorgungsnetze als Drehstromnetz gebaut.

Auf die Erzeugung und Ausnutzung des Drehstroms wird in Teil 2 dieses Handbuchs noch näher eingegangen.

3.3.1.1. Die Sternschaltung

In dem Versuch nach Abb. 79 sind die drei Außenleiter an drei Spulen mit je 1200 Windungen angeschlossen. Die Spulenenenden sind miteinander verbunden, an die Verbindungsstelle ist der Mittelpunktsschalter angeschaltet. Weil die drei Spulen in Form eines Sterns geschaltet sind, nennt man diese Schaltung die **Sternschaltung**. Den Anschaltpunkt für den Mittelpunktsschalter bezeichnet man als **Sternpunkt**. Bei der Untersuchung dieser Schaltung stellen wir fest:

Die Sternschaltung



(Abb. 79)

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

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) beträgt im öffentlichen Niederspannungsnetz $U = 380$ Volt.

Die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt beträgt dann $U_{ph} = 220$ 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 $U_{ph} = \frac{U}{1,73}$

3.3.1.2. Die Dreieckschaltung

Bei dem Versuch nach Abb. 80 werden die drei Spulen so an die drei Außenleiter R, S, T angeschlossen, daß je ein Spulenende 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 **Dreieckschaltung**. Bei dieser Schaltung wird kein Mittelpunktsschalter verwendet, sie gilt also nur für gleichmäßige Belastung der drei Außenleiter. Bei der Untersuchung dieser Schaltung stellen wir fest:

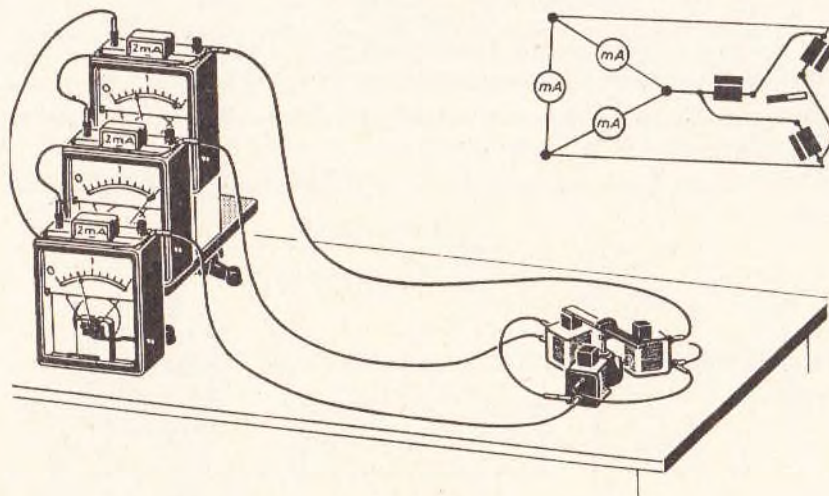
1. Die Ströme in den drei Außenleitern sind gleich groß.

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:

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

Die Dreieckschaltung



(Abb. 80)

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

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

2. Bei der Dreieckschaltung ist die Außenspannung gleich der Phasenspannung.

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

$$U = U_{ph}$$

3.3.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.3.

1. Wie kann man in einer Anordnung drei Wechselströme erzeugen, die um 120° phasenverschoben sind? 2. Was versteht man unter Drehstrom? 3. Welche Eigenschaften hat der Drehstrom? 4. Welche Vorteile ergeben sich aus der Eigenart des Drehstroms? 5. Wie werden die vier Leiter eines Drehstromnetzes bezeichnet? 6. Skizzieren Sie ein in Sternschaltung verkettetes Drehstromnetz! 7. Wie verhalten sich Außenleiterstrom zu Phasenstrom und Außenspannung zu Phasenspannung bei der Sternschaltung? 8. In welchem Verhältnis stehen Außenspannung zu Phasenspannung und Außenstrom zu Phasenstrom bei der Dreieckschaltung?

4. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis

Im Abschnitt 3.2. 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.

4.1. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen

4.1.1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand

Die Abb. 81 entspricht der uns bekannten Abb. 70. Wir erinnern uns auch, daß bei einem rein ohmschen Widerstand Strom und Spannung in Phase sind, während bei einem rein induktiven Widerstand der Strom der Spannung um 90° nacheilt. Wir haben bisher die Größen für Strom und Spannung zeichnerisch ermittelt, nunmehr wollen wir es mit Hilfe des Pythagoreischen Lehrsatzes rechnerisch wiederholen. Aus dem Zeigerdiagramm der Abb. 81 entnehmen wir:

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

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

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

$$U = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_L)^2}$$

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

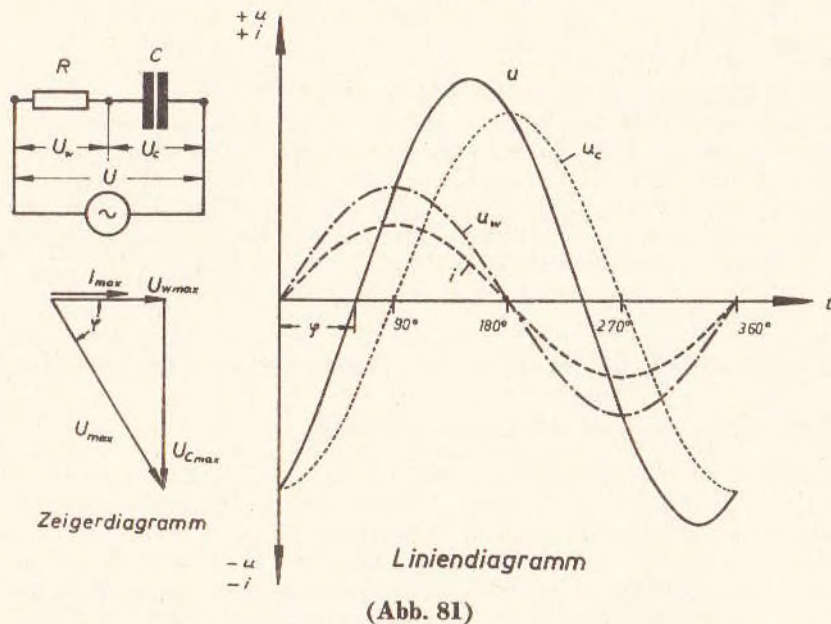
$$U = I \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Das Verhältnis $\frac{U}{I}$ ist dann der gesamte Widerstand der Reihenschaltung, den wir bereits als Scheinwiderstand Z kennen.

Es ist also:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \Omega$$

Reihenschaltung von R und L



Wenn wir die Phasenlage zwischen der Gesamtspannung U und dem Strom I errechnen wollen, können wir uns des Cosinus des Winkels φ bedienen. Unter dem Cosinus eines Winkels versteht man das Verhältnis von Ankathete zur Hypotenuse (im übrigen siehe über Winkelfunktionen im Band B 1). Aus unserem Zeigerdiagramm können wir also ableiten:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{I \cdot R}{I \cdot Z} = \frac{R}{Z}$$

Wir fassen unsere Erkenntnisse nochmals zusammen:

Bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und induktivem Widerstand eilt der Strom der Spannung nach. Dabei ergibt sich der Cosinus des Phasenwinkels aus dem Verhältnis von Wirkwiderstand zu Scheinwiderstand.

Beispiel:

Eine Spule hat einen Wirkwiderstand von 50 Ohm und eine Induktivität von 4 mH. Wie groß ist 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 ; φ

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

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{50^2 + 20^2} = \underline{\underline{53,85 \Omega}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{50 \Omega}{53,9 \Omega} = 0,926$$

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

4.1.2. Wirkwiderstand und kapazitiver Widerstand

Wir haben bereits das Verhalten des Kondensators im Wechselstromkreis kennengelernt und dabei festgestellt, daß der Strom der Spannung um 90° vorausschlägt. Wenn wir jetzt einen ohmschen Widerstand mit einem Kondensator in Reihe schalten, so zeigt uns das Zeigerdiagramm der Abb. 82, daß der Strom und der Spannungsabfall über dem Wirkwiderstand ($U_R = I \cdot R$) in Phase sind, während die Spannung am Kondensator dem Strom um 90° nachhinkt. Es ist

$$U_C = I \cdot X_C$$

Aus dem Zeigerdiagramm können wir weiter entnehmen, daß

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2 \text{ oder } U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \text{ ist.}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz wird

$$U = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_C)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Auch hier erhalten wir aus dem Verhältnis $\frac{U}{I}$

den Scheinwiderstand Z :

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

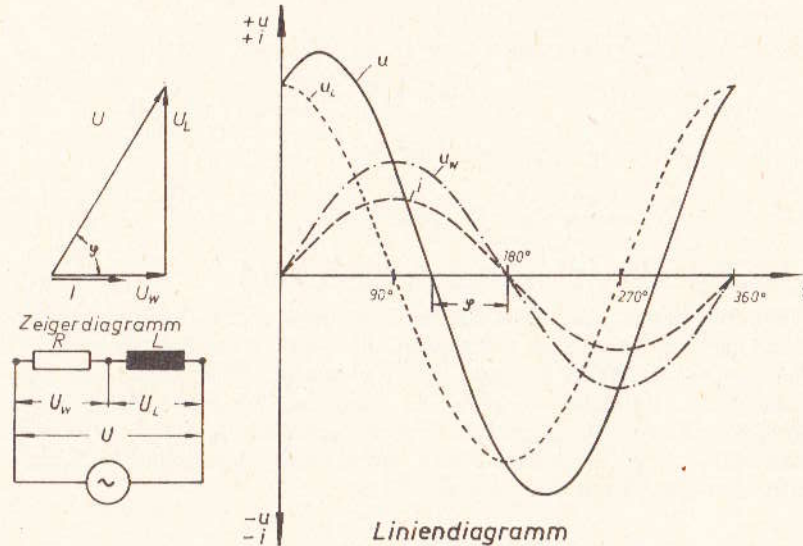
Der Phasenwinkel errechnet sich genauso wie bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und induktivem Widerstand zu

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{I \cdot R}{I \cdot Z} = \frac{R}{Z}$$

Wir fassen unsere Erkenntnisse zusammen:

Bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und kapazitivem Blindwiderstand eilt der Strom der Spannung voraus. Dabei ergibt sich der Cosinus des Phasenwinkels aus dem Verhältnis des Wirkwiderstands zum Scheinwiderstand.

Reihenschaltung von R und C



(Abb. 82)

Beispiel:

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

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

Gesucht: Z ; φ

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

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{60^2 + 50^2} = \underline{\underline{78,1 \Omega}}$$

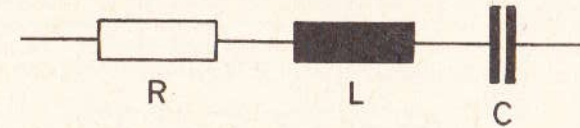
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60 \Omega}{78,1 \Omega} = 0,768$$

$$\varphi = \underline{\underline{\text{rd. } 40^\circ}}$$

4.1.3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand

Die Widerstände werden in der in Abb. 83 gezeigten Weise hintereinandergeschaltet.

Reihenschaltung von R, L und C

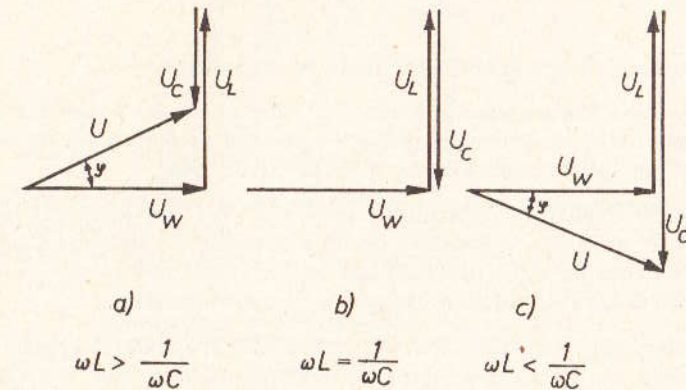


(Abb. 83)

Aus dem Zeigerdiagramm nach Abb. 84 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° beträgt.

Aus dem Zeigerdiagramm der Abb. 84 ersehen wir außerdem, daß die Werte für U abhängig sind von den Werten für U_L und U_C . Bei einer Reihenschaltung fließt durch jeden Teilwiderstand der gleiche Strom. Am Wirkwiderstand liegt die Wirkspannung in Phase mit dem Strom. Wirkgrößen zeichnet man immer waagerecht. Wie wir bereits festgestellt haben, eilt an einer Induktivität die Spannung dem Strom um 90° vor-

Spannungs-Zeigerdiagramm für die Reihenschaltung R, L und C



(Abb. 84)

aus. Der Zeiger für die Spannung an der Induktivität (U_L) ist daher unter einem Winkel von $+90^\circ$ darzustellen. An einer Kapazität eilt dagegen die Spannung dem Strom um 90° nach. Somit ist der Zeiger für die Spannung an der Kapazität (U_C) unter einem Winkel von -90° , d. h. nach unten, abzutragen. Die Spannung U_C ist also von der Spannung U_L

abzuziehen. Nach den bisherigen Betrachtungen und mit Hilfe der Zeigerdiagramme nach Abb. 84 können wir die Formel für den Scheinwiderstand ableiten:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_W^2 + (U_L - U_C)^2} \\ &= \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_L - I \cdot X_C)^2} \\ &= I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \end{aligned}$$

Teilen wir beide Seiten der Gleichung durch I , so ergibt sich der Scheinwiderstand:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \Omega$$

Den Phasenwinkel erhält man wie üblich aus:

$$\cos \varphi = \frac{U_W}{U} = \frac{I \cdot R}{I \cdot Z} = \frac{R}{Z}$$

Der Ausdruck $(X_L - X_C)$ stellt den gesamten in der Reihenschaltung wirksamen Blindwiderstand dar, so daß man setzen kann:

$$X_L - X_C = X$$

Aus den Zeigerdiagrammen nach Abb. 84 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. 84a).

Ist der kapazitive Widerstand größer als der induktive, so eilt der Strom der Spannung voraus; der Phasenwinkel ist negativ (Abb. 84c). 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. 84b) (Resonanzfall).

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 μ F liegt an einer Spannung von 220 V bei einer Frequenz von 50 Hz. Berechnen Sie den Scheinwiderstand, den Phasenwinkel, den Strom und die Spannungsabfälle über den Widerständen!

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

Gesucht: Z ; φ ; I ; U_W ; U_L ; U_C

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

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

$$X_C = 31,8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{50^2 + (62,8 - 31,8)^2}$$

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

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{50 \Omega}{58,9 \Omega} = 0,848$$

$$\varphi = \underline{\underline{\text{rd. } 32^\circ}}$$

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

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

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

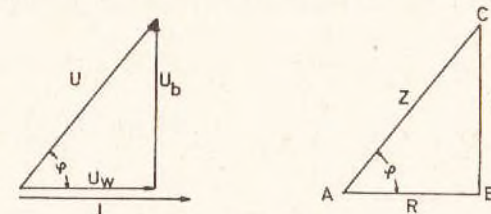
$$U_L = I \cdot X_L = 3,74 \cdot 62,8 = \underline{\underline{\text{rd. } 235 \text{ V}}}$$

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

4.1.4. Das Widerstandszeigerdiagramm

Im linken Teil der Abb. 85 ist ein Spannungszeigerdiagramm aufgezeichnet. Dabei ist der Strom I als der Bezugszeiger, auf den die anderen Zeiger bezogen sind, anzusehen. Die Wirkspannung ist mit dem Strom in

Spannungs- und Widerstandszeigerdiagramm



(Abb. 85)

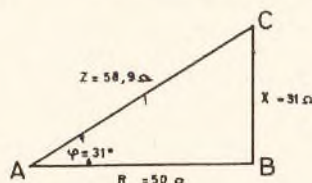
Phase, wie wir es schon früher erkannt haben. Senkrecht zu U_w ist die Blindspannung aufgetragen, die hier von dem gesamten Blinderwiderstand, sowohl von dem induktiven als auch von dem kapazitiven, abhängig ist. U ergibt sich als Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks.

Wenn wir jetzt die Beträge der Spannungen durch den Wert des Stromes teilen, so erhalten wir das Widerstandszeigerdiagramm (im rechten Teil der Abb. 85) mit den Seiten R , X und Z . Wir erkennen, daß der Phasenwinkel von der Größe des Stroms unabhängig ist. Mit Hilfe des Widerstandszeigerdiagramms kann man den Scheinwiderstand Z und den Phasenwinkel φ zeichnerisch ermitteln (siehe hierzu Band B 1).

Beispiel:

Wir wollen uns der Werte aus dem Beispiel des vorhergehenden Abschnitts bedienen. Es waren $R = 50 \Omega$ und $X = 31 \Omega$ ($X_L - X_C$). Wir tragen also auf der Waagerechten $R = 50 \Omega = 5 \text{ cm}$ ab. Sodann errichten wir im Punkt B die Senkrechte und tragen $X = 31 \Omega = 3,1 \text{ cm}$ ab. Die Verbindungslinie zwischen den Punkten A und C entspricht dem Wert für Z ; wir messen $5,89 \text{ cm}$, 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. 86 gekennzeichnet.)

Widerstandszeigerdiagramm



(Abb. 86)

4.1.5. Das Spannungszeigerdiagramm

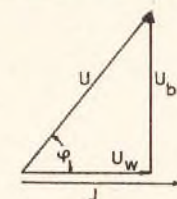
Mit Hilfe des Spannungszeigerdiagramms kann man die Spannung U in ihren Wirk- und Blindanteil zerlegen. Dabei ist immer darauf zu achten, daß der Wirkanteil (Pfeil U_w) mit dem Bezugsstrahl (Strom) in Phase ist.

Aus dem Spannungszeigerdiagramm nach Abb. 87 können wir ableiten:

$$\cos \varphi = \frac{U_w}{U}, \text{ also } U_w = U \cdot \cos \varphi \text{ und}$$

$$\sin \varphi = \frac{U_b}{U}, \text{ also } U_b = U \cdot \sin \varphi.$$

Spannungszeigerdiagramm



(Abb. 87)

4.1.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.1.

1. Was versteht man unter einem zusammengesetzten Wechselstromkreis? 2. Wie kann man bei einer Reihenschaltung den Phasenverschiebungswinkel φ zwischen U und I bestimmen, wenn Wirkwiderstand und Scheinwiderstand bekannt sind? 3. Wie groß ist der Scheinwiderstand einer Spule, deren Wirkwiderstand 40Ω und deren Induktivität 3 mH beträgt, bei einer Frequenz von 1000 Hz ? 4. Welchen Scheinwiderstand besitzt die Wicklung eines Transformators, wenn bei einer Wechselspannung von $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ ein Strom von $0,8 \text{ Ampere}$ gemessen wird? 5. Welcher Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom ergibt sich in einer Reihenschaltung eines Wirkwiderstands von $R = 250 \Omega$ mit einem Kondensator von $C = 8 \text{ Mikروفarad}$ bei einer Frequenz von 50 Hz ? 6. An einer Spannung von $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ liegt eine Reihenschaltung von $R = 30 \Omega$, $C = 50 \text{ Mikروفarad}$ und $L = 0,1 \text{ Henry}$. Wie groß sind der Scheinwiderstand Z und die Stromaufnahme der Reihenschaltung? Welche Phasenverschiebung ergibt sich zwischen Spannung und Strom? 7. Wie groß sind die Spannungen an C , L und R in folgender Reihenschaltung: $R = 250 \Omega$, $C = 12 \text{ Mikروفarad}$ und $L = 1,5 \text{ Henry}$, wenn die Gesamtspannung $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ beträgt? 8. Zeichnen Sie Widerstands- und Spannungszeigerdiagramm für die Schaltung nach Aufg. 7.!

4.2. 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 Abschnitt „Parallelresonanz“.)

4.3. Die Leistung im Wechselstromkreis

Ein Verbraucher (ohmscher Widerstand) nimmt im Gleichstromkreis eine Leistung auf, die dem Produkt aus Spannung mal Strom entspricht:

$$P = U \cdot I \quad (U \text{ in V, } I \text{ in A}).$$

Für U kann nach dem Ohmschen Gesetz $I \cdot R$ gesetzt werden. Dann ist

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

Ebenso kann für $I = \frac{U}{R}$ eingesetzt werden.

$$\text{Das ergibt für } P = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}.$$

Die Maßeinheit für die Leistung ist das Watt.

Fließen durch einen Widerstand bei 1 V Spannungsabfall 1 A, dann wird in ihm die Leistung von 1 Watt verbraucht. Auch für die elektrische Leistung sind verschiedene praktische Größenordnungen üblich:

$$\text{Mikrowatt } (\mu\text{W}) = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ W} = 10^{-6} \text{ W}$$

$$\text{Milliwatt (mW)} = \frac{1}{1\,000} \text{ W} = 10^{-3} \text{ W}$$

Watt (W)

$$\text{Kilowatt (kW)} = 1\,000 \text{ W} = 10^3 \text{ W}$$

$$\text{Megawatt (MW)} = 1\,000\,000 \text{ W} = 10^6 \text{ W}.$$

Die elektrische Leistung ist im Gleichstromkreis in jedem Augenblick gleich groß, da sich Spannung und Strom nicht in ihrer Größe oder Richtung ändern.

Ebenso wie im Gleichstromkreis ergibt sich auch im Wechselstromkreis die Leistung aus dem Produkt Spannung mal Strom. Hier müssen wir jedoch berücksichtigen, daß **Spannung und Strom ständig ihre Größe und Richtung ändern**.

Außerdem können **Spannung und Strom gegeneinander phasenverschoben** sein. Die von einem Verbraucher aufgenommene Leistung ändert sich daher auch in jedem Augenblick $p = u \cdot i$ (Augenblickswert der Leistung).

Zur Bestimmung der mittleren Leistung (Dauerleistung) im Wechselstromkreis muß man die Leistungsaufnahme eines Verbrauchers während einer Periode des Wechselstroms zugrunde legen. Die mittlere Leistung im Wechselstromkreis ergibt sich dann aus dem arithmetischen Mittel der Augenblickswerte. Das soll durch zeichnerische Darstellung veranschaulicht werden.

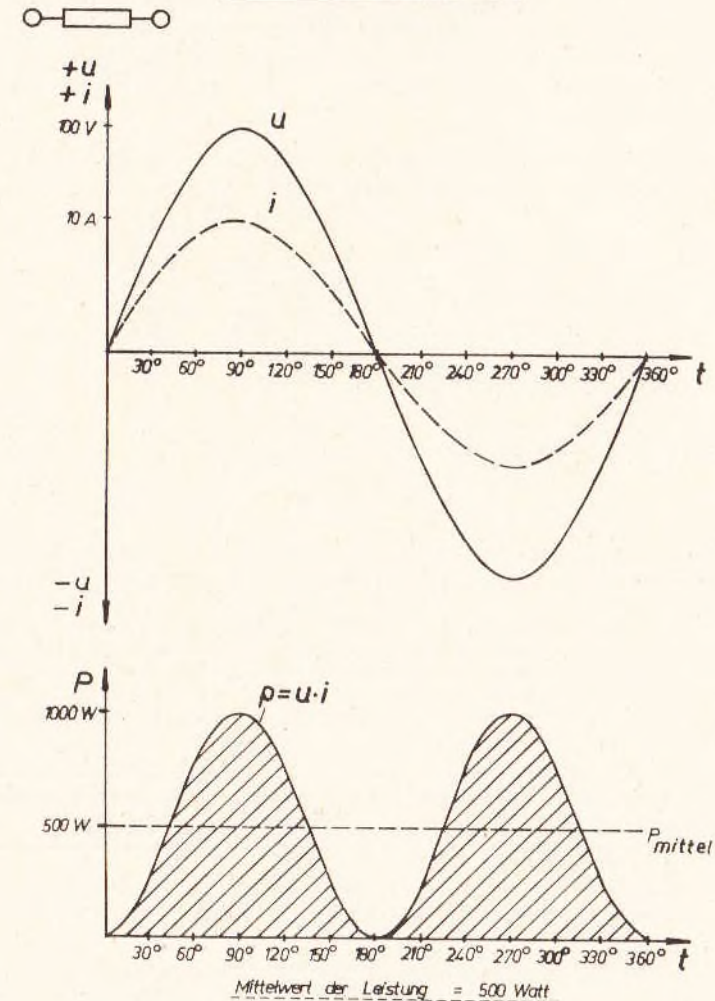
Bei den folgenden vier Beispielen wird grundsätzlich von der gleichen Spannung und dem gleichen Strom ausgegangen, und zwar $U_{\max} = 100 \text{ V}$ und $I_{\max} = 10 \text{ A}$. Als Maßstab gilt $1 \text{ cm} \triangleq 40 \text{ V}$ bzw. $1 \text{ cm} \triangleq 8 \text{ A}$. Unterschiede ergeben sich also nur aufgrund der durch die verschiedenen Widerstände verursachten Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

4.3.1. Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstandes

1. Beispiel:

Wird ein Wirkwiderstand in einen Wechselstromkreis eingeschaltet, so tritt zwischen Spannung und Strom keine Phasenverschiebung auf.

Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für einen Wirkwiderstand



(Abb. 88)

Zeichnen wir das Liniendiagramm für Spannungs- und Stromverlauf an einem Wirkwiderstand und bilden für jeden Augenblick das Produkt aus Spannung mal Strom, so erhalten wir ein Liniendiagramm für die Leistung (Abb. 88).

Die Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstands schwankt zwischen Null und einem Höchstwert. Der Flächeninhalt zwischen Leistungsdiagramm und Nulllinie ist ein Maß für die aufgenommene Energie. Will man den arithmetischen Mittelwert bilden, so braucht man die Flächen nur so zu verteilen, daß sich eine Rechteckfläche ergibt. Die Höhe ergibt dann die durchschnittliche Leistungsaufnahme (Mittelwert der Leistung = Dauerleistung). Aus dem Leistungsdiagramm läßt sich leicht erkennen, daß die mittlere Leistung = Dauerleistung nur halb so groß wie die höchste Augenblicksleistung ist.

Für unser Beispiel ergibt sich für die mittlere Leistung 500 Watt, während die höchste Leistung 1000 Watt beträgt.

Somit ist:

$$P = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{2} \text{ oder } P = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Da } \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = U_{\text{eff}} \text{ und } \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = I_{\text{eff}},$$

gilt für die Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstandes:

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

Die Tatsache, daß die Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstands im Wechselstromkreis periodisch zwischen Null und einem Höchstwert schwankt, läßt sich mit Hilfe einer Glühlampe geringer Leistungsaufnahme (z. B. 220 V/15 W) leicht nachweisen. Stellt diese Glühlampe die einzige Lichtquelle in einem dunklen Raum dar, so erscheint ein vor dunklem Hintergrund schnell bewegter heller Gegenstand mehrmals nebeneinander (die Lampe erlischt ja zwischenzeitlich). Diese Erscheinung wird in der Technik häufig zur Drehzahlmessung von Maschinen und Geräten – z. B. Studio-plattenspieler, Tonfilmprojektoren – ausgenutzt. Man spricht dabei von einem Stroboskop-Effekt.

Die von einem Wirkwiderstand im Wechselstromkreis verbrauchte Leistung wird als Wirkleistung bezeichnet.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Wirkleistung	P	W (Watt)

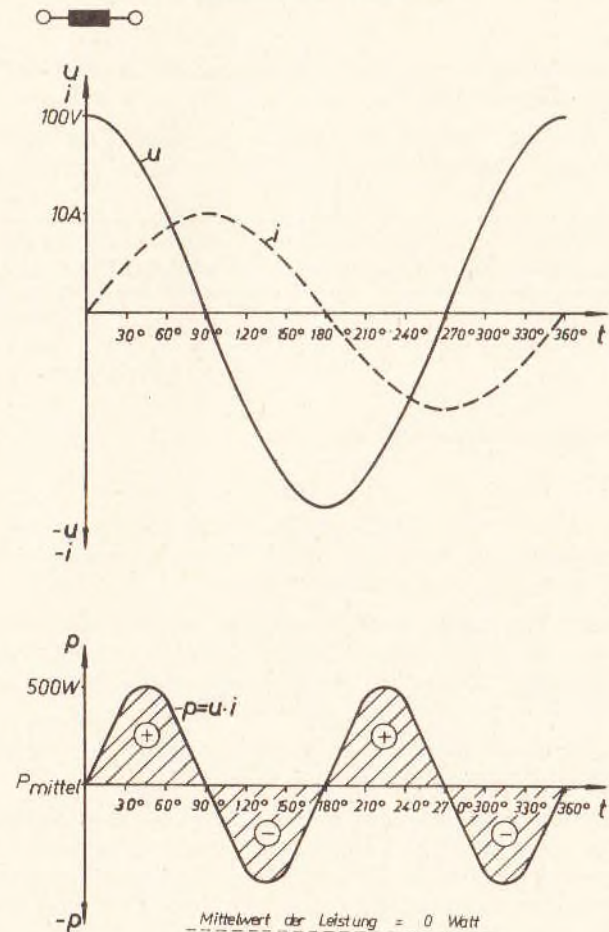
Viele Wechselstromverbraucher enthalten nur Wirkwiderstände. Dazu gehören Glühlampen und Heizgeräte, wie Lötkolben, Bügeleisen, Tauchsieder, el. Kochplatten, el. Heizungen.

4.3.2. Leistungsaufnahme einer Induktivität

2. Beispiel:

Belasten wir eine Wechselstromquelle mit einer reinen Induktivität, so tritt zwischen Spannung und Strom eine Phasenverschiebung von 90° auf. Der Strom eilt der Spannung um 90° nach.

Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm
für eine Induktivität



(Abb. 89)

Auch hier soll das Leistungsdiagramm aus dem Spannungs-Strom-Diagramm ermittelt werden.

Bildet man wieder für jeden Augenblick einer Periode das Produkt aus Spannung mal Strom, so ergibt sich ein Leistungsdiagramm, das zu gleichen Teilen im positiven und negativen Bereich verläuft. Dabei bedeuten positive Leistung = aufgenommene Leistung und negative Leistung = erzeugte oder zurückgegebene Leistung.

Da die positiven und negativen Leistungen im Verlauf einer Periode gleich groß sind, beträgt ihre Summe = 0 Watt. Eine Induktivität verbraucht also keine Leistung.

Oder:

Die von einer reinen Induktivität aufgenommene Leistung wird voll an die Energiequelle zurückgegeben.

Sie nimmt zunächst Energie zum Aufbau des Kraftfeldes auf (positive Leistung) und gibt sie beim Abbau des Feldes wieder zurück (negative Leistung).

Man bezeichnet die Leistung, die von einem reinen Blindwiderstand an die Energiequelle zurückgegeben wird, auch als Blindleistung.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Blindleistung	Q	Var (Voltampere reactiv ¹)

4.3.3. Leistungsaufnahme einer Kapazität

3. Beispiel:

Bei Belastung einer Wechselstromquelle durch eine Kapazität beträgt die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom ebenfalls 90° . Hier eilt die Spannung dem Strom 90° nach.

Das aus dem Spannungs-Strom-Diagramm abgeleitete Leistungsdiagramm entspricht dem Leistungsdiagramm für eine Induktivität, d. h. der Mittelwert oder Durchschnittswert der Leistung beträgt auch hier 0 Watt. Siehe Abb. 90!

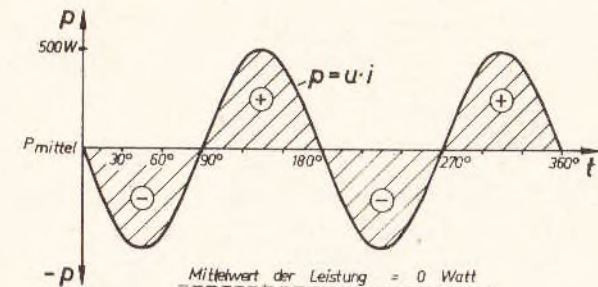
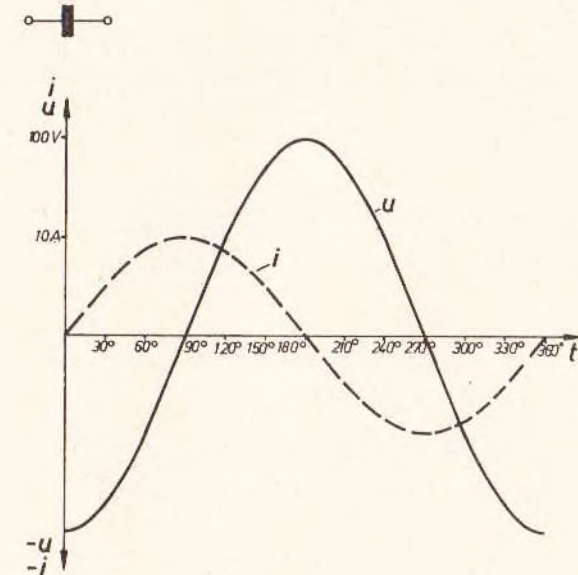
Eine Kapazität nimmt keine Wirkleistung auf, da sie die aufgenommene Leistung voll an die Energiequelle zurückgibt.

Die Kapazität nimmt zunächst zum Aufbau des elektrischen Feldes (dielektrische Verschiebung) Energie auf (positive Leistung) und gibt diese Energie beim Abbau des Feldes wieder ab (negative Leistung). Aus der Ableitung der Leistungskurven für Induktivität und Kapazität folgern wir:

¹) reactiv = rückwirkend

Ein reiner Blindwiderstand nimmt nur Blindleistung auf.

Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für eine Kapazität



(Abb. 90)

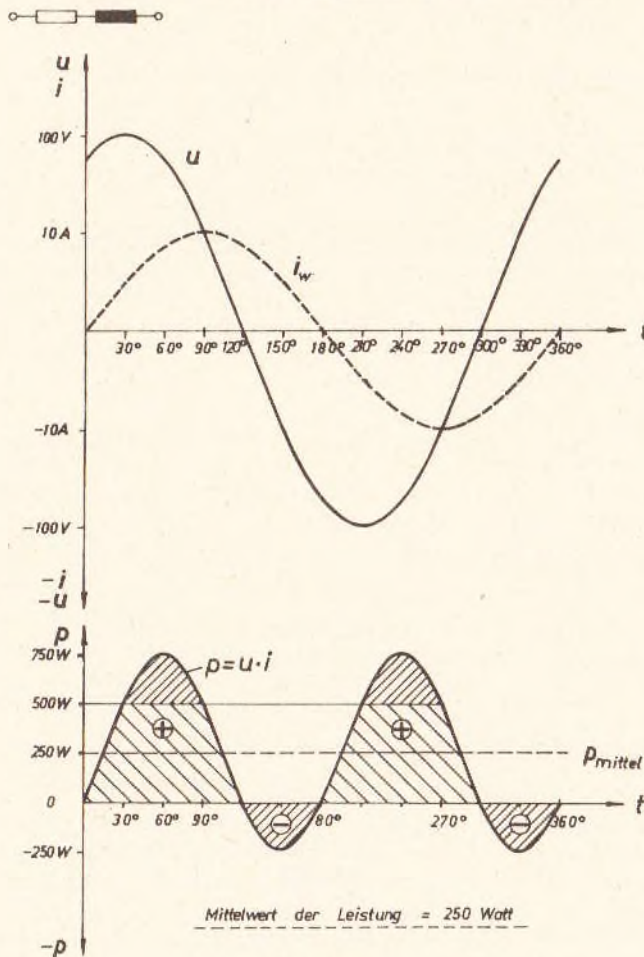
Für die praktische Anwendung ergibt sich daraus: Eine Induktivität oder Kapazität kann zur verlustlosen Strom- oder Spannungsbegrenzung im Wechselstromkreis eingesetzt werden.

4.3.4. Leistungsaufnahme einer Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderstand

4. Beispiel:

Praktisch sind reine Blindwiderstände kaum herstellbar. Außer einer Induktivität besitzt nämlich eine Spule auch einen Wirkwiderstand

Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für eine Reihenschaltung aus Wirk- und Blindwiderstand



(Abb. 91)

(Drahtwiderstand der Wicklung). Bei einem Kondensator kann man den Isolationswiderstand des Dielektrikums vor allem bei hohen Frequenzen nicht ohne weiteres vernachlässigen. In praktisch vorkommenden Schaltungen findet man also fast immer neben Blindwiderständen auch Wirkwiderstände – z. B. auch Anlaßwiderstände für Wechselstrommotoren, Widerstand der Anschlußleitungen zu Motoren oder Transformatoren usw. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom liegt bei solchen Schaltungen zwischen 0° und 90° . In einem Diagramm soll eine Phasenverschiebung von 60° angenommen werden. Leitet man aus dem Spannungs-Strom-Diagramm wieder das Leistungsdiagramm ab, so erkennt man, daß nur ein Teil der aufgenommenen Leistung an die Energiequelle zurückgegeben wird. Dagegen wird ein bestimmter Anteil der Leistung „verbraucht“.

In unserem Beispiel beträgt der Mittelwert (Durchschnittswert) der verbrauchten Leistung 250 Watt. Das entspricht einem Leistungsanteil von 50% an der gesamten aufgenommenen Leistung bei 0° Phasenverschiebung.

4.3.5. Folgerungen aus den Beispielen 4.3.1. bis 4.3.4.

Die im Wechselstromkreis von einem Stromverbraucher aufgenommene bzw. verbrauchte Wirkleistung ist von der durch den Verbraucher verursachten Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom abhängig. Diese Phasenverschiebung läßt sich auch durch die Winkelfunktion „cos“ ausdrücken.

Damit ergibt sich die Formel für die Wirkleistung im Wechselstromkreis:

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

Da die Leistung vom „cos φ “ abhängt, nennt man „cos φ “ auch den **Leistungsfaktor**.

Für U und I sind grundsätzlich deren Effektivwerte einzusetzen!

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	1

Für unsere Beispiele ergibt sich:

Wirkwiderstand: geg. $U_{\max} = 100 \text{ V}$, daher $U_{\text{eff}} = 70,7 \text{ V}$;
 $I_{\max} = 10 \text{ A}$, daher $I_{\text{eff}} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = 0^\circ$; $\cos \varphi = 1$.

$$P = 70,7 \cdot 7,07 \cdot 1 = \underline{\underline{500 \text{ W}}}$$

Induktivität: geg. $U_{eff} = 70,7 \text{ V}$; $I_{eff} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = +90^\circ$; $\cos \varphi = 0$.
 $P = 70,7 \cdot 7,07 \cdot 0 = \underline{\underline{0 \text{ W}}}$

Kapazität: geg. $U_{eff} = 70,7 \text{ V}$; $I_{eff} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = -90^\circ$; $\cos \varphi = 0$.
 $P = 70,7 \cdot 7,07 \cdot 0 = \underline{\underline{0 \text{ W}}}$

Reihenschaltung aus Blind- und Wirkwiderstand:
 geg. $U_{eff} = 70,7 \text{ V}$; $I_{eff} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = +60^\circ$; $\cos \varphi = 0,5$.
 $P = 70,7 \cdot 7,07 \cdot 0,5 = \underline{\underline{250 \text{ W}}}$

Aus den Meßergebnissen einer Spannungs- und Strommessung im Wechselstromkreis kann die Wirkleistung oder Blindleistung nicht berechnet werden, wenn die Phasenverschiebung bzw. der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ nicht bekannt ist.

In unseren Beispielen würde ein Spannungsmesser in allen Fällen die Effektivspannung 70,7 V, ein Strommesser den Effektivstrom 7,07 A anzeigen. Das Produkt $U \cdot I$ wäre also in jedem Fall 500. Da das aber nicht die tatsächlich verbrauchte Wirkleistung ist, bezeichnet man dieses Produkt als Scheinleistung.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Scheinleistung	S	VA (Voltampere)

Aus den gesammelten Erkenntnissen kann zusammengefaßt werden:

Wirkleistung $P \text{ (W)}$	ist die von einem Wirkwiderstand wirklich verbrauchte Leistung.
Blindleistung $Q \text{ (Var)}$	ist die von einem Blindwiderstand (Induktivität oder Kapazität) aufgenommene, aber in voller Höhe zurückgegebene Leistung.
Scheinleistung $S \text{ (VA)}$	ist die von einem Scheinwiderstand scheinbar aufgenommene Leistung. Sie läßt keinen Rückschluß zu, wie groß Wirk- oder Blindleistung sind!
Leistungsfaktor $\cos \varphi$	gibt an, wieviel Anteil von der gesamten, aufgenommenen Scheinleistung wirklich verbraucht wird.

Die Leistungsart hängt von der Art der Widerstände ab. Man kann daher für die Leistungen aus dem Widerstandsdiagramm ein entsprechendes Leistungs-Zeigerdiagramm ableiten (vgl. Abb. 92).

Für die Widerstände einer Reihenschaltung gilt:

$$Z^2 = R^2 + X^2.$$

Multipliziert man beide Seiten der Gleichung mit I^4 , so erhält man

$$I^4 Z^2 = I^4 R^2 + I^4 X^2$$

oder

$$(I^2 \cdot Z)^2 = (I^2 \cdot R)^2 + (I^2 \cdot X)^2.$$

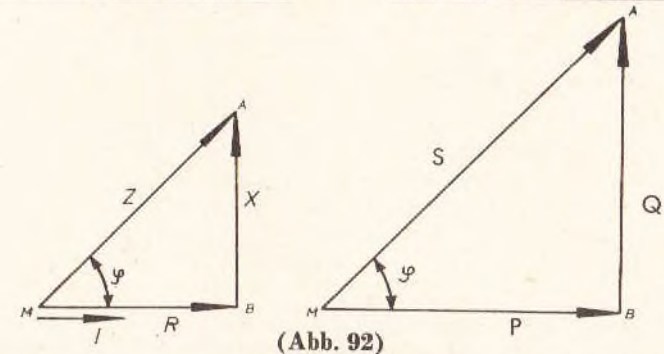
Dafür kann man setzen

$$S^2 = P^2 + Q^2.$$

Man erkennt daraus, daß die Leistungsaufnahme der einzelnen Widerstände einer Reihenschaltung von deren Größe und dem Quadrat der Stromstärke abhängt. Demnach müssen sowohl die Widerstände als auch deren Leistungsaufnahme im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Die entsprechenden Zeigerdiagramme (Abb. 92) sind also ähnliche Dreiecke; d. h., sie stimmen in den drei Winkeln überein.

Widerstands-Zeigerdiagramm

Leistungs-Zeigerdiagramm



Da die Scheinleistung die größte Leistung im Wechselstromkreis ist, wird die Nennleistung von Wechselstromerzeugern und Wechselstromverbrauchern (z. B. Transformatoren) meistens in VA (= Maßeinheit der Scheinleistung) angegeben. Die Wicklungen müssen ja – damit sie nicht zu warm werden – für die größte Leistung ausgelegt sein.

Für die Leistungsberechnung im Wechselstromkreis ergeben sich folgende Beziehungen:

Wirkleistung: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$= \frac{U_R^2}{R} = I_R^2 \cdot R$
Scheinleistung: $S = U \cdot I$	$= \frac{U^2}{Z} = I^2 \cdot Z$
Blindleistung: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	$= \frac{U_X^2}{X} = I_X^2 \cdot X$

Darin bedeuten:

U = Effektivwert der Gesamtspannung,

I = Effektivwert des Gesamtstromes,
 U_R = Spannung am Wirkwiderstand R ,
 I_R = Strom, der durch den Wirkwiderstand R fließt,
 U_X = Spannung am Blindwiderstand X ,
 I_X = Strom, der durch den Blindwiderstand X fließt,
 φ = Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

Neben den genannten Formeln ist die Bestimmung der Leistung auch mit Hilfe des Lehrsatzes des Pythagoras möglich:

$$S^2 = P^2 + Q^2.$$

Durch Umstellen der Formeln läßt sich jeweils eine Leistungsart aus den beiden anderen errechnen. Den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ kann man bestimmen anhand

der Widerstände:	$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$	oder
der Spannungen:	$\cos \varphi = \frac{U_W}{U}$	
der Leistungen:	$\cos \varphi = \frac{P}{S}$	

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

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

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: Q

Lösung: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

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 $\sin = 0,5275$

$$Q = 220 \cdot 460 \cdot 0,5275 = \underline{\underline{53\,400 \text{ Var}}}$$

3. Beispiel:

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

Gegeben: $P = 30 \text{ kW}$; $Q = 18 \text{ kVar}$

Gesucht: S ; $\cos \varphi$

Lösung: $S^2 = P^2 + Q^2$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
 $S = \sqrt{30^2 + 18^2} = \sqrt{1\,224} = \underline{\underline{35 \text{ kVA}}}$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{30 \text{ kW}}{35 \text{ kVA}} = \underline{\underline{0,86}}$$

4.3.6. Die Drehstromwirkleistung

Die Erzeugung des Drehstroms ist bereits behandelt worden. Dabei wurde festgestellt:

Drehstrom ist ein Dreiphasen-Wechselstrom. Er setzt sich aus 3 einzelnen Phasen Wechselstrom zusammen, die um je 120° gegeneinander phasenverschoben sind.

Die Summe der Spannungen oder Ströme ist in jedem Augenblick gleich Null, wobei eine gleichmäßige Belastung der 3 Phasen vorausgesetzt wird.

Aufgrund dieser Eigenschaften des Drehstroms können die 3 Phasen verkettet werden, so daß man mit nur 3 (oder höchstens 4) Leitern auskommt. Für die Verkettung der Phasen gibt es zwei Grundschaltungsarten:

die Sternschaltung λ und die Dreieckschaltung Δ .

Schalten wir einen Verbraucher an das Drehstromnetz, so können wir auch hier die beiden Schaltungsarten Stern- oder Dreieckschaltung anwenden.

Zur Bestimmung der gesamten Leistungsaufnahme eines Drehstromverbrauchers muß die Summe aus 3 Wechselstromleistungen gebildet werden:

$$P_{\text{Drehstrom}} = 3 \cdot P_{\text{Ph}} = 3 \cdot I_{\text{Ph}} \cdot U_{\text{ph}} \cdot \cos \varphi.$$

Auf der Verbraucherseite gilt

a) bei der Sternschaltung:

$$I_{\text{Ph}} = I_{\lambda} \text{ und}$$

$$U_{\text{Ph}} = \frac{U_{\lambda}}{1,73}.$$

$$\text{Somit } P = 3 \cdot I_{\text{Ph}} \cdot U_{\text{Ph}} \cdot \cos \varphi$$

$$\text{oder } P = 3 \cdot I_{\lambda} \cdot \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\lambda} \cdot U_{\lambda}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$$

Nach Kürzung ergibt sich:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} \cdot U_{\Delta} \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot I_{\Delta} \cdot U_{\Delta} \cdot \cos \varphi.$$

b) bei der Dreieckschaltung:

$$I_{Ph} = \frac{I_{\Delta}}{1,73} \text{ und}$$

$$U_{Ph} = U_{\Delta}.$$

$$\text{Somit } P_{\Delta} = 3 \cdot I_{Ph} \cdot U_{Ph} \cdot \cos \varphi$$

$$\text{oder } P_{\Delta} = 3 \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}} U_{\Delta} \cos \varphi = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} \cdot U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$$

Nach Kürzung ergibt sich

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} \cdot U_{\Delta} \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot I_{\Delta} \cdot U_{\Delta} \cdot \cos \varphi.$$

Die Leistungsformel für Drehstrom gilt also sowohl für die Sternschaltung als auch für die Dreieckschaltung. Dabei ist zu beachten, daß dabei immer die Außenspannung und der Außenstrom einzusetzen sind. Diese beiden Werte können auch gemessen werden.

Wirkleistung im Drehstromkreis:

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

Beispiel:

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

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

Gesucht: P

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

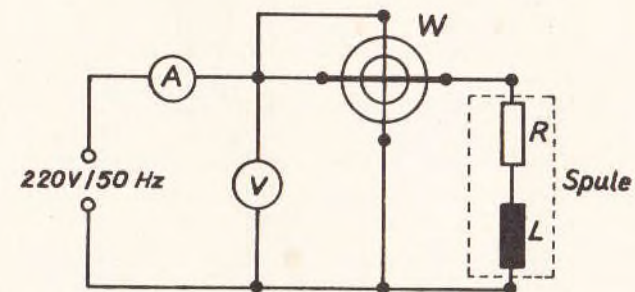
4.3.7. Messung der Wirkleistung

Zur Bestimmung oder Messung der Wirkleistung kann nur bei reinen Wirkwiderständen (ohmschen Widerständen) die Anzeige von Spannungs- und Strommesser herangezogen werden, da hier der Phasenwinkel 0° , der $\cos \varphi$ also 1 ist.

Bei allen anderen Wechselstromverbrauchern, die sich aus Wirk- und Blindwiderständen zusammensetzen, muß auch die Phasenverschiebung berücksichtigt werden. Eine Messung von Wirkleistungen im Wechselstromkreis ermöglicht das Wattmeter. Das Wattmeter ist ein sog. dynamisches Meßgerät mit ähnlichem Aufbau wie ein Drehspulmeßwerk. An Stelle des Dauermagneten tritt beim Wattmeter eine stromdurchflossene feste Spule. Schaltet man die feste Spule in Reihe (Strommessung), die Drehspule parallel zum Verbraucher (Spannungsmessung), dann wirkt auf die Drehspule ein Drehmoment, das dem Produkt der Augenblickswerte von Spannung und Strom entspricht (Leistungsdiagramm).

Der Zeiger stellt sich dabei aufgrund seiner Trägheit auf den Mittelwert der Leistung ein. Die Abb. 93 zeigt eine Meßschaltung mit Hilfe eines Wattmeters (W).

Wirkleistungsmessung mit dem Wattmeter



(Abb. 93)

Die zusätzliche Messung der Spannung (Voltmeter) und des Stromes (Amperemeter) ermöglichen die Bestimmung der Scheinleistung ($S = U \cdot I$)

$$\text{und des } \cos \varphi \left(\cos \varphi = \frac{P}{S} \right).$$

4.3.8. Phasenkompensation

Die von einem Verbraucher im Wechselstromkreis oder Drehstromkreis aufgenommene Wirkleistung hängt von der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom ab. Beträgt die Phasenverschiebung 90° , so ist $\cos \varphi = 0$. Der Verbraucher nimmt dann nur Blindleistung auf und gibt sie wieder an die Energiequelle zurück.

Der Blindstrom verursacht aber auf den Verbindungsleitungen zwischen Kraftwerk und Verbraucher einen Wirkleistungsverlust $I^2 \cdot R$. Außerdem müssen die Generatoren im Kraftwerk ständig diesen Blindstrom erzeugen, ohne daß dafür bezahlt wird. Die Kraftwerke fordern daher vor allem von Großabnehmern elektrischer Energie eine Mindestgrenze für den Leistungsfaktor $\cos \varphi$.

Da die Wechselstromverbraucher außer Wirkwiderständen (el. Heizung, Glühlampen) meistens Spulen oder Wicklungen (Motoren, Transformatoren) enthalten, wird der Leistungsfaktor im allgemeinen durch deren Induktivitäten verschlechtert. **Um den Leistungsfaktor zu verbessern, kann der induktive Blindstrom durch Kondensatoren kompensiert werden, da Kondensatoren eine entgegengesetzt gerichtete Phasenverschiebung bewirken.** Daher werden zur Verbesserung des Leistungsfaktors parallel zu den Verbrauchern mit großen Induktivitäten Kondensatoren geschaltet.

Dafür gilt die Bedingung

$$Q_C = Q_L$$

Das heißt ein Phasenschieberkondensator muß so bemessen werden, daß er eine gleich große – aber um 180° phasenverschobene – Blindleistung erzeugt wie die im Verbraucher enthaltene Induktivität. In diesem Fall hebt der Kondensator die durch die Induktivität verursachte Phasenverschiebung auf. Der Leistungsfaktor der Schaltung wird damit 1. Da die Phasenverschiebung bei Motoren und Transformatoren jedoch stark belastungsabhängig ist, kann praktisch keine ideale, vollständige Kompensation erreicht werden. Trotzdem wird durch eine Phasenkompensation eine erhebliche Verbesserung des Leistungsfaktors erzielt und ein größerer Verlust an elektrischer Energie vermieden.

4.3.9. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.3.

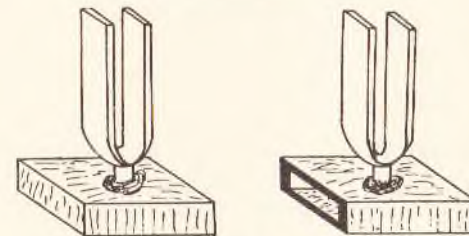
1. Wie kann man die Leistungsaufnahme eines beliebigen Verbrauchers im Wechselstromkreis anhand des Spannungs-Strom-Diagramms ermitteln? 2. Wir wirkt sich bei Glühlampen die Tatsache aus, daß die Wechselstromleistung zwischen Null und einem Höchstwert schwankt? Wo wird dieser Effekt ausgenutzt? 3. Was versteht man unter der Wirkleistung? 4. Erläutern Sie den Begriff Blindleistung! 5. Warum verlangen Energieversorgungsunternehmen von Großverbrauchern u. U. eine Kompensation der Blindleistung? 6. Was versteht man unter Scheinleistung? 7. Warum wird die Nennleistung von Wechselstromerzeugern und -verbrauchern in VA angegeben? 8. Was versteht man unter dem Begriff Leistungsfaktor? 9. Durch welche Art Verbraucher ergibt sich ein niedriger Leistungsfaktor? 10. Wie kann man den Leistungsfaktor verbessern? 11. Nach welcher Formel läßt sich die Wirkleistung im Wechselstromkreis errechnen? 12. Warum genügen eine Spannungs- und eine Strommessung nicht, um die Wirkleistung eines Wechselstromverbrauchers zu bestimmen? 13. Wie kann man die Wirkleistungsaufnahme eines Wechselstromverbrauchers direkt messen? 14. Skizzieren Sie eine Meß-Schaltung zur direkten Wirkleistungsmessung! 15. Welche Bedingung gilt für eine vollständige Phasenkompensation?

4.4. 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. 94)

Wir nehmen zwei Stimmgabeln mit dem Kammerton a und stellen sie in geringer Entfernung einander gegenüber (Abb. 94). 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.

4.4.1. Die Reihenresonanz

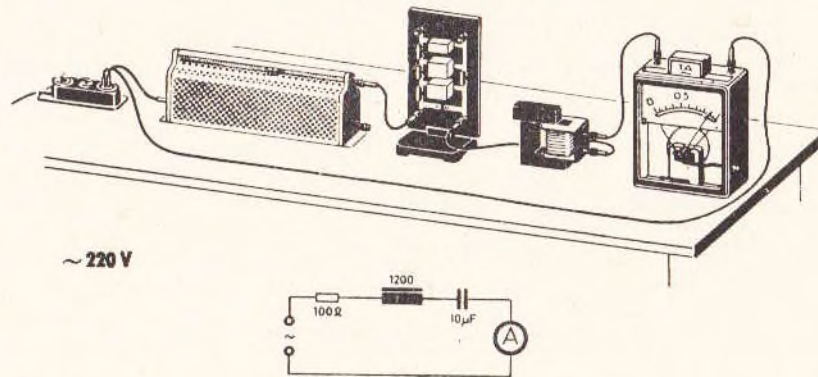
Zunächst wollen wir noch einen Versuch mit hintereinandergeschalteten Wechselstromwiderständen nach Abb. 95 durchführen.

Wir schalten zu Beginn einen ohmschen Widerstand und einen Kondensator von $10 \mu F$ in Reihe. Das Amperemeter zeigt einen Wert von etwa 0,4 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 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 A ab.

Jetzt wollen wir alle drei Widerstände (Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand) hintereinanderschalten. 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.

Der Reihenresonanzkreis



(Abb. 95)

Aus dem Versuch erkennen wir:

Bei der Reihenschaltung induktiver mit kapazitiven Blindwiderständen 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 X_L gleich sein muß X_C .

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

Die Frequenz, bei der $X_L = X_C$ ist, bezeichnet man als Resonanzfrequenz

Da es sich hier um die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen handelt, sprechen wir von Reihenresonanz.

Die Blindwiderstände X_L und X_C sind frequenzabhängig

$\left(X_L = 2\pi f \cdot L; \quad X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \right)$. 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 gering-

sten, 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. Multipliziert man beide Seiten der Gleichung mit ω , so erhält man

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

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

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

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

und nach f aufgelöst, ergibt sich die Resonanzfrequenz zu:

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

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

An Hand eines Beispiels wollen wir die Blindspannungen untersuchen.

Beispiel:

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

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

Gesucht: $f_{res}; \quad I; \quad U_L; \quad U_C$

Lösung: Nach der Thomsonischen Formel ist

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

$$= \frac{1}{2\pi \sqrt{0,000004}} = \underline{\underline{79,6 \text{ Hz}}}$$

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:

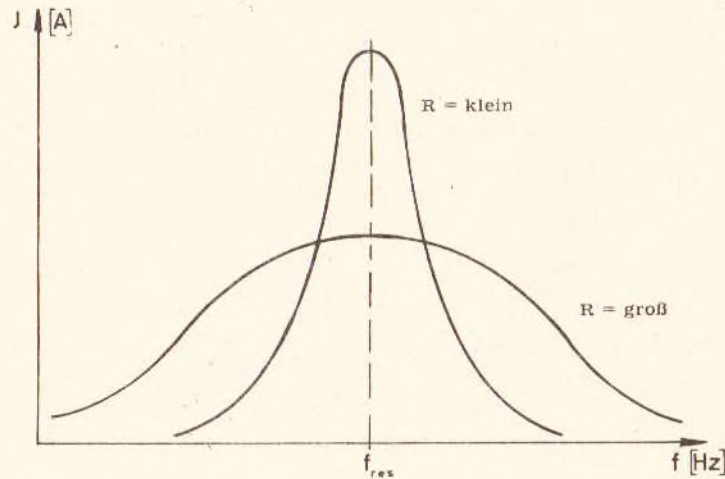
$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{22} = \underline{\underline{10 \text{ A}}}$$

Die Spannungsabfälle über den Blindwiderständen errechnen sich zu $U_L = I \cdot \omega L = 10 \cdot 2\pi \cdot 79,6 \cdot 0,2 = \underline{\underline{\text{rd. } 1000 \text{ V}}}$

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

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 V liegt. Man nennt deshalb die Reihenresonanz auch **Spannungsresonanz**.

Reihenresonanz-Kurven



(Abb. 96)

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

Die Abb. 96 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

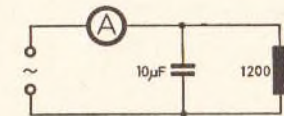
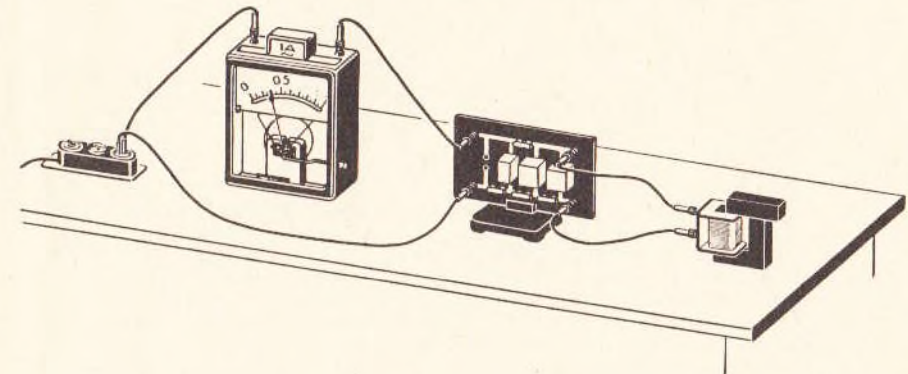
und damit eines geringen Durchlaßbereichs (unter- und oberhalb der Resonanzfrequenz) muß der ohmsche Widerstand sehr klein gehalten werden (siehe Abb. 96).

4.4.2. Die Parallelresonanz

Bei dem Versuch nach Abb. 97 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 A an. Legen wir statt des Kondensators eine Spule mit geschlossenem Eisenkern an das Netz, so zeigt das Instrument etwa 0,2 A an.

Der Parallelresonanzkreis



(Abb. 97)

Schalten 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:

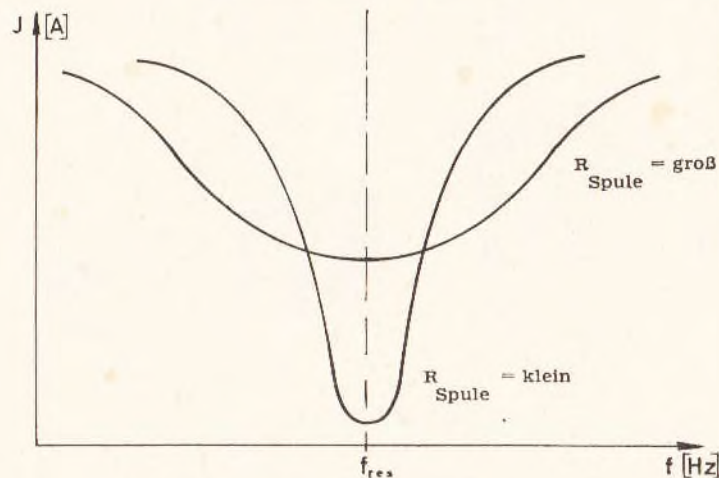
Bei der Parallelschaltung von induktiven und kapazitiven Blindwiderständen ist der Gesamtwiderstand nicht wie bei ohmschen Widerständen kleiner, sondern größer als einer der Teilwiderstände.

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**.

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°

Parallelresonanz-Kurven



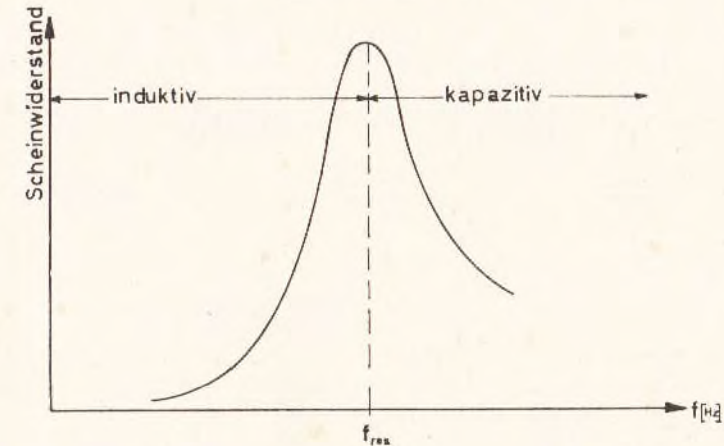
(Abb. 98)

gegeneinander verschoben und heben sich damit auf (Mindestwert des Stromes beim Versuch nach Abb. 97). Man spricht deshalb auch von der **Stromresonanz**.

Die Resonanzkurve der Parallelresonanz (Abb. 98) 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. 99). Widerstand und Strom stehen im umgekehrten Verhältnis.

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

Der Scheinwiderstand in Abhängigkeit
von der Frequenz



(Abb. 99)

4.4.3. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.4.

1. Was versteht man unter Resonanz?
2. Welche Wirkung auf den Gesamtwiderstand und den Strom einer Reihenschaltung aus Wirkwiderstand und Induktivität hat das Zuschalten einer Kapazität?
3. Unter welcher Voraussetzung befindet sich eine Reihenschaltung aus Wirkwiderstand, Induktivität und Kapazität in Resonanz?
4. Was kann man über den Gesamtwiderstand einer auf Resonanz abgestimmten Reihenschaltung aus Wirkwiderstand, Induktivität und Kapazität aussagen?
5. Schreiben Sie die Resonanzbedingung als Formel und stellen Sie die Formel nach ω um!
6. Warum spricht man bei der Reihenresonanz auch von Spannungsresonanz?
7. Skizzieren Sie eine Reihenresonanzkurve (Abhängigkeit des Stromes von der Frequenz)!
8. Wie muß ein Reihenresonanzkreis beschaffen sein, wenn er eine hohe Güte haben soll?
9. Wie verhält sich der Gesamtwiderstand eines Parallelresonanzkreises, wenn die Frequenz von 0 an immer weiter gesteigert wird?
10. Warum spricht man bei Parallelresonanz auch von Stromresonanz?

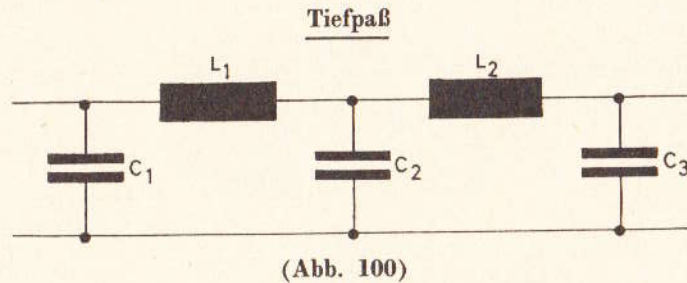
4.5. Elektrische Filter und Weichen

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

4.5.1. Der Tiefpaß

Eine Schaltungsanordnung von Induktivitäten und Kapazitäten nach dem Schema der Abb. 100 nennt man einen **Tiefpaß**. Die hintereinanderge-

geschalteten Induktivitäten L_1 und L_2 bezeichnet man als **Längsinduktivitäten**, während die quer zur Leitung liegenden Kapazitäten **Querkapazitäten** genannt werden.

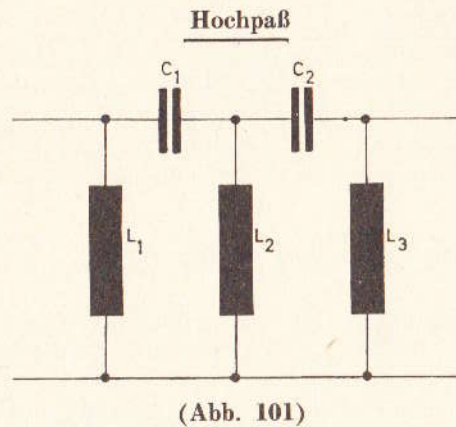


Bei richtiger Bemessung der Größen für C und L werden, bezogen auf eine bestimmte Frequenz (**Grenzfrequenz**), höher liegende Frequenzen gesperrt und tiefer liegende durchgelassen.

Man nennt den Tiefpaß wegen der Längsinduktivitäten auch **Drosselkette**.

4.5.2. Der Hochpaß

Das Schema der Abb. 101 stellt einen Hochpaß dar. Im Gegensatz zur Abb. 100 haben wir hier **Längskapazitäten** und **Querinduktivitäten**.

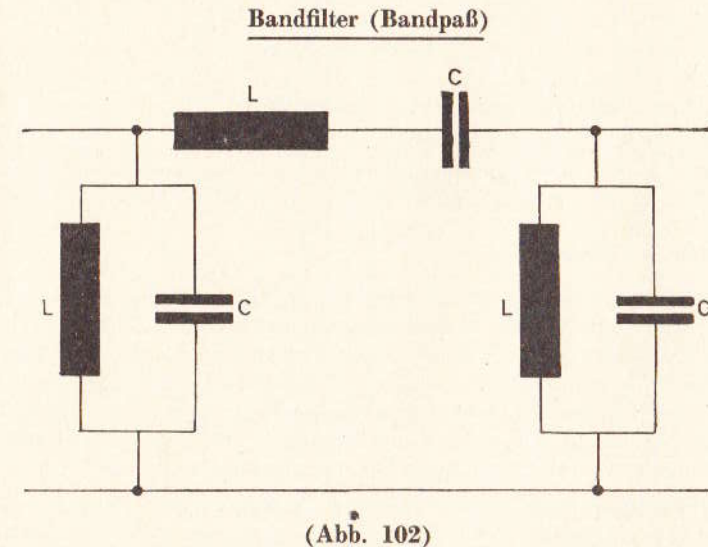


Bei richtiger Bemessung der Größen für C und L werden die unterhalb der Grenzfrequenz liegenden Frequenzen gesperrt und die oberhalb liegenden durchgelassen.

Der Hochpaß wird wegen der Längskapazitäten auch **Kondensatorkette** genannt.

4.5.3. Bandfilter (Bandpaß)

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

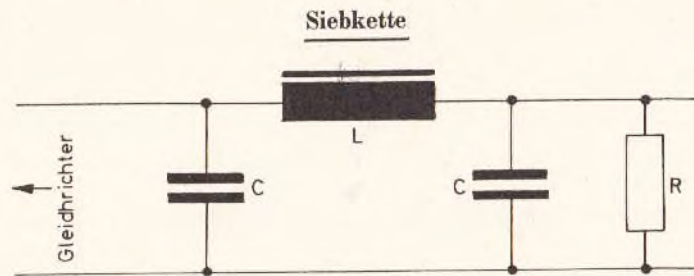


möglichkeiten von Induktivitäten und Kapazitäten. Eine davon ist in der Abb. 102 wiedergegeben. Die Wirkung der Bandfilter beruht auf der Wirkung der Reihenresonanz und der Parallelresonanz.

4.5.4. Siebketten

Wie Abb. 103 zeigt, ist eine **Siebketten** ähnlich wie ein Tiefpaß aufgebaut. Siebketten haben die Aufgabe, die Welligkeit des durch einen Gleichrichter gleichgerichteten Wechselstromes auszugleichen. In jeder Gleichrichteranlage finden wir Siebketten vor, weil z. B. zu den Röhren von Rundfunkgeräten, Verstärkern usw. und zu den Mikrofonen von Nebensstellenanlagen nur **reiner** Gleichstrom gelangen darf.

Auf die Wirkungsweise und Bedeutung der Siebketten wird im Teil 2 dieses Handbuchs noch näher eingegangen.



(Abb. 103)

4.5.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 4.5.

1. Welche Eigenschaften hat ein Tiefpaß? 2. Skizzieren Sie die Schaltung eines Tiefpasses! 3. Für welche Zwecke werden Tiefpässe bzw. Siebketten verwendet? 4. Was versteht man unter einem Bandfilter? 5. Wo finden Bandfilter Verwendung?

Physikalische Einheiten

Im Jahre 1954 hat die Generalkonferenz für Maß und Gewicht allen Staaten das **Internationale Einheitensystem (SI-System)** zur Einführung empfohlen. Das Internationale Einheitensystem ermöglicht eine einfache und einheitliche internationale technische Zusammenarbeit und den Austausch von physikalischen und technischen Informationen, ohne daß damit die Notwendigkeit einer Umrechnung gegeben ist. Es beruht auf sechs voneinander unabhängigen Grundeinheiten:

- | | |
|------------------------------------|-------------------|
| 1. Längeneinheit | 1 Meter, |
| 2. Masseneinheit | 1 Kilogramm, |
| 3. Zeiteinheit | 1 Sekunde, |
| 4. Einheit der elektr. Stromstärke | 1 Ampere, |
| 5. Temperatureinheit | 1 Grad Kelvin und |
| 6. Lichtstärkeinheit | 1 Candela. |

Nach den ersten vier Grundeinheiten wird dieses Einheitensystem auch als **MKSA-System** (= Meter-Kilogramm-Sekunde-Ampere-System) bezeichnet. Alle anderen Einheiten werden aus den 6 genannten Grundeinheiten gebildet und als abgeleitete Einheiten bezeichnet.

Zu den abgeleiteten Einheiten gehört u.a. auch das in diesem Handbuch verwendete Tesla (Einheit für die magn. Induktion). Um den Übergang zu den heute in zunehmendem Maße angewendeten MKSA-Einheiten zu erleichtern, sind in diesem Handbuch die MKSA-Einheiten und die bisher verwendeten Einheiten nebeneinander behandelt worden.

Wir empfehlen jedoch, die MKSA-Einheiten vorrangig anzuwenden.

Anhang

Tabelle der Sinus-, Cosinus- und Tangenswerte

Grad	sin	cos	tan	Grad	sin	cos	tan
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	5,14
35	0,574	0,819	0,700	80	0,985	0,174	5,67
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
40	0,643	0,766	0,839	85	0,996	0,087	11,4
41	0,656	0,755	0,869	86	0,998	0,070	14,3
42	0,669	0,743	0,900	87	0,999	0,052	19,1
43	0,682	0,731	0,933	88	0,999	0,035	28,6
44	0,695	0,719	0,966	89	1,000	0,017	57,3
45	0,707	0,707	1,000	90	1,000	0,000	∞

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe BFt —

15

wichtige Lehr- und Lernwerke zur Vorbereitung auf den
Grundlehrgang Ft 2, die verschiedenen Aufbaulehrgänge
BFt und den Abschlußlehrgang BFt

Band G — Grundlagen der Fernmeldetechnik (2 Teile)

Band E — Entstörungstechnik (2 Teile)

Band L — Linientechnik (2 Teile)

Band V — Vermittlungstechnik (3 Teile)

Band T — Telegrafentechnik (2 Teile)

Band U — Übertragungstechnik (2 Teile)

Band Fu — Funktechnik (2 Teile)

Umfang je Band etwa 180 Seiten

Sonderband:

Allgemeines Prüfungswissen
(für die Kräfte des BFW-, BFt- und BPt-Dienstes)
(2 Teile)

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag

6 Frankfurt 1 — Savignystraße 43