
Handbuch

der

Fernmeldetechnik

Grundreihe



Band 3

**Grundlagen der Gleich-
und Wechselstromlehre**

Teil 2

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Grundreihe —

13

**wichtige Lehr- und Lernwerke (mit Repetitoren)
für Auszubildende**

Band 1

— Allgemeine Berufskunde

Berufsbildungsgesetz — Berufsausbildungsvertrag — Ausbildungs- und Prüfungsordnung für Fernmeldehandwerker — Jugendarbeitschutzgesetz — Dienstverhältnisse bei der Deutschen Bundespost — Staatsaufbau — Grundrechte und -pflichten des Staatsbürgers — Tarifverträge für Fernmeldelehrlinge und Arbeiter bei der DBP — Sozialeinrichtungen — Personalvertretungsgesetz — Aufbau und Aufgaben der DBP — Fernmelderecht — Verhalten gegenüber dem Kunden, Schadenshaftung — Arbeitsschutz und Unfallverhütung — Schriftformen von Meldungen, Gesuchen und Prüfungsarbeiten

● Repetitor zum Band 1

Band 2

— Grundkenntnisse der Mathematik und der Physik (mit Lösungsheft)

Rechnen mit bestimmten Zahlen — Buchstabenrechnung — Potenzrechnung — Radizieren — Die Lehre von den Gleichungen — Die grafische Darstellung von Funktionen — Proportion — Kreisfunktionen — Dreisatz- und Prozentrechnung — Zahlensysteme — Stabrechnen — Aufbau und Zustandsformen der Körper — Arbeit und Leistung — Einfache Maschinen — Wärmelehre — Akustik — Optik

● Repetitor zum Band 2

Band 3

— Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre (2 Teile)

Grundlagen der Gleichstromlehre — Wirkungen des Stroms — Das elektrische Feld — Magnetismus — Wirkungen des Magnetismus — Grundlagen der Wechselstromlehre — Die Messung elektrischer Größen — Transformatoren — Fernmeldeübertrager

● Repetitor zum Band 3

Band 4

— Aufgabensammlung zu Band 3 (mit Lösungsheft)

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik

Grundreihe

Herausgegeben mit Unterstützung
des Bundesministers
für das Post- und Fernmeldewesen

Band 3

Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre Teil 2

2., verbesserte Auflage

Deutsche Postgewerkschaft - Hauptvorstand - Verlag - 6 Frankfurt 71 - Rhonestraße 2

Hinweis

Der Band 3 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik — Grundreihe“ besteht aus den Teilen 1 und 2. Beide Teile ergänzen sich und bilden ein Ganzes.

Im Teil 1 des Bandes wird folgender Lehrstoff behandelt:

1. Einführung in die Elektrizitätslehre
2. Grundlagen der Gleichstromlehre
3. Wirkungen des Stroms
4. Das elektrische Feld
5. Spannungserzeuger

Stand: Frühjahr 1973

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
6. Magnetismus und seine Größen	
6.1. Dauermagnetismus	7
6.1.1. Die Naturerscheinung „Magnetismus“	7
6.1.2. Form und Aufbau der Magnete	7
6.1.3. Das magnetische Feld	10
6.2. Elektromagnetismus	12
6.2.1. Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters	12
6.2.2. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum	13
6.3. Was ist Magnetismus ?	15
6.4. Eisen im Magnetfeld	17
6.4.1. Die magnetische Influenz	19
6.4.2. Die magnetische Abschirmung	20
6.5. Die Größen des magnetischen Feldes	21
6.5.1. Die elektrische Durchflutung Θ	21
6.5.2. Die magnetische Feldstärke H	24
6.5.3. Die Permeabilität μ	26
6.5.4. Die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion B	27
6.5.5. Der magnetische Fluß Φ	30
6.6. Hystereseschleife und Magnetisierungskurve	31
6.6.1. Hystereseschleife	31
6.6.2. Magnetisierungskurven	34
6.7. Vergleich elektrischer Stromkreis – magnetischer Kreis	37
6.8. Anwendungsbeispiele (Bauteile mit elektromagnetischer Wirkung)	39
6.8.1. Relais	39
6.8.2. Wecker	39
6.8.3. Fernhörer	41
7. Die Wirkungen des Magnetismus	
7.1. Die Kraftwirkung auf Eisen im Magnetfeld	44
7.2. Fremdinduktion	46
7.2.1. Induktion der Bewegung	46

	Seite
7.2.2. Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)	51
7.2.3. Wirbelströme	56
7.3. Selbstinduktion	59
7.3.1. Richtung des Selbstinduktionsstroms	59
7.3.2. Höhe der Selbstinduktionsspannung	60
7.3.3. Induktivität	61
7.3.4. Ein- und Ausschaltvorgänge in Spulenstromkreisen	63
7.3.5. Schaltung von Induktivitäten	67
7.4. Bewegung durch Induktion	68
7.4.1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	68
7.4.2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld	70
8. Grundlagen der Wechselstromlehre	
8.1. Entstehung des Wechselstroms	74
8.1.1. Die bewegte Spule im Magnetfeld	74
8.1.2. Der zeitliche Verlauf der Wechselspannung	74
8.1.3. Die Periode und die Frequenz	77
8.1.4. Maximal- und Effektivwerte	78
8.2. Wechselstromwiderstände	82
8.2.1. Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis	82
8.2.2. Die Spule im Wechselstromkreis	83
8.2.3. Der Kondensator im Wechselstromkreis	95
8.3. Mehrphasenwechselstrom	99
8.3.1. Drehstrom	99
9. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis	
9.1. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen	105
9.1.1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand	105
9.1.2. Wirkwiderstand und kapazitiver Widerstand	107
9.1.3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand	108
9.1.4. Widerstandszeigerdiagramm	111
9.1.5. Spannungszeigerdiagramm	112
9.2. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen	112
9.3. Die Leistung im Wechselstromkreis	113
9.3.1. Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstands	114
9.3.2. Leistungsaufnahme einer Induktivität	116

	Seite
9.3.3. Leistungsaufnahme einer Kapazität	117
9.3.4. Leistungsaufnahme einer Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderstand	118
9.3.5. Folgerungen aus den Beispielen 9.3.1 bis 9.3.4	120
9.3.6. Drehstromwirkleistung	124
9.3.7. Messung der Wirkleistung	125
9.3.8. Phasenkompensation	125
9.4. Resonanz	126
9.4.1. Reihenresonanz	126
9.4.2. Parallelresonanz	129
9.5. Elektrische Filter und Weichen	132
9.5.1. Tiefpaß	132
9.5.2. Hochpaß	132
9.5.3. Bandfilter (Bandpaß)	133
9.5.4. Siebketten	133
10. Die Messung elektrischer Größen	
10.1. Allgemeines über den Aufbau von Meßinstrumenten und Meßwerken	135
10.2. Meßwerke	138
10.2.1. Drehspulmeßwerk	138
10.2.2. Das elektrodynamische Meßwerk	142
10.2.3. Dreheisenmeßwerk	144
10.2.4. Vibrationsmeßwerk (Zungenfrequenzmesser)	147
10.2.5. Das elektrostatische Meßwerk	149
10.2.6. Thermische Meßwerke	151
10.2.7. Eigenschaften der Meßwerke	152
10.3. Meßinstrumente	153
10.3.1. Einfache Meßinstrumente	153
10.3.2. Vielfachinstrumente	154
10.3.3. Meßinstrumente für Wechselstrom- und spannungsmessungen	157
10.3.4. Meßtechnische Eigenschaften von Meßinstrumenten	158
10.3.5. Sinnbilder und Schaltzeichen	163
10.3.6. Kennzeichen auf der Skala eines Meßinstruments	164
10.3.7. Meßbereichserweiterung bei Spannungs- und Strommessern	164
10.4. Messung elektrotechnischer Grundgrößen	169
10.4.1. Spannungsmessung	169
10.4.2. Strommessung	173
10.4.3. Leistungsmessung	175
10.4.4. Widerstandsmessung	176
10.4.5. Dämpfungsmessung	184
10.4.6. Bestimmung von Kapazitäten und Induktivitäten durch indirekte Messungen	185

11. Transformatoren/Fernmeldeübertrager

11.1. Starkstromtransformatoren	188
11.1.1. Verhältnis der Spannungen	188
11.1.2. Verhältnis der Ströme	190
11.1.3. Wirkungsgrad eines Transformators	193
11.1.4. Berechnung des erforderlichen Eisenquerschnitts	195
11.1.5. Berechnung der Windungszahlen	195
11.1.6. Anwendung von Transformatoren	197
11.2. Übertrager in der Fernmeldetechnik	198
11.2.1. Anwendung des Übertragers	198
11.2.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Übertragers	199
11.2.3. Das Übersetzungsverhältnis des Übertragers	200
11.2.4. Induktionsspule	202

12. Elektrische Maschinen

12.1. Generatoren	203
12.1.1. Wechselstromgeneratoren	204
12.1.2. Drehstromerzeugung	205
12.1.3. Regelung der Wechsel- und Drehstromgeneratoren	206
12.1.4. Gleichstromerzeugung	207
12.2. Motoren	210
12.2.1. Entstehung eines Drehmoments	210
12.2.2. Gegenspannung im Motor	211
12.2.3. Aufbau von Gleichstrommotoren	211
12.2.4. Universalmotor	213
12.2.5. Motoren für Dreh- und Wechselstrom	213
12.3. Maschinenumformer	217
12.3.1. Einankerumformer/Ruf- und Signalmaschine (RSM)	218

6. Magnetismus und seine Größen

6.1. Dauermagnetismus

6.1.1. 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 „Magneisensteine“. Die den Magneisensteinen innewohnende Kraft ist eine Naturerscheinung wie die Elektrizität.

Die Magneisensteine 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. 6.1 zeigt, wie man künstliche Magnete herstellen kann:

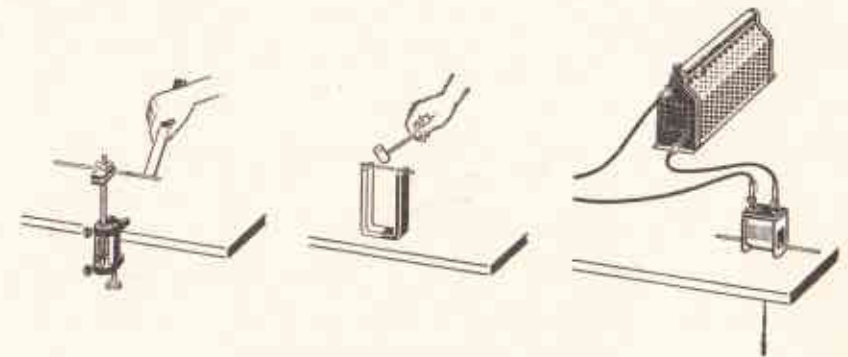


Abb. 6.1 – Herstellung künstlicher Magnete

- 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 Stroms.

6.1.2. Form und Aufbau der Magnete

Abb. 6.2 zeigt einige der gebräuchlichsten Arten der in der Technik verwendeten Magnete.

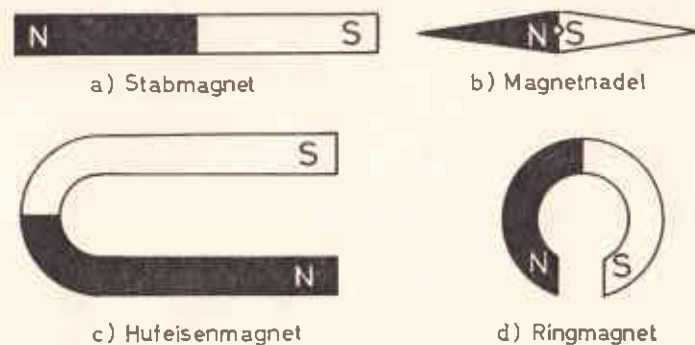


Abb. 6.2 – Magnetformen

6.1.2.1. Magnetpole

Einen Stabmagneten wollen wir näher untersuchen. Wir halten ihn dicht über ein Häufchen Eisennägel (Abb. 6.3); 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.

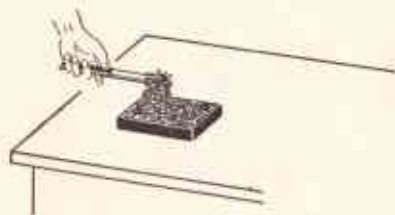


Abb. 6.3 – Kraftwirkung am Magnetpol

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. 6.4 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.

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 geografischen vom magnetischen Pol angibt.

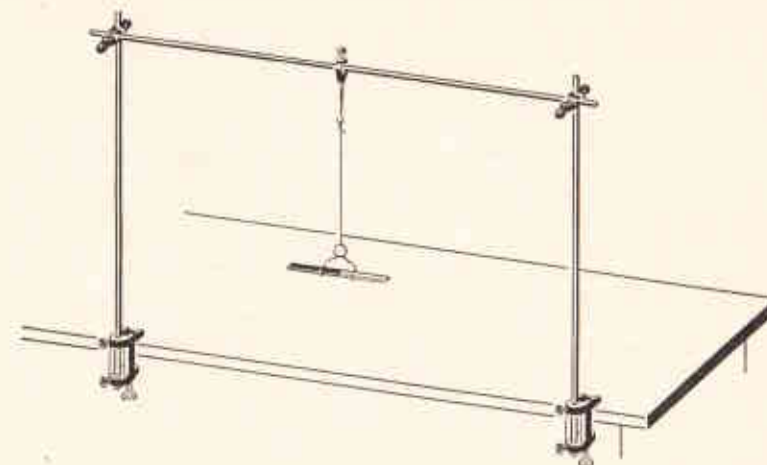


Abb. 6.4 – Richtkraft eines Magneten

Aus der ursprünglichen Festlegung, daß der Magnet-Nordpol nach Norden weist, ergibt sich nun, daß z.B. beim geografischen Nordpol der erdmagnetische Südpol liegen muß. Den Beweis dafür führen wir mit Hilfe eines Versuchs nach Abb. 6.5.

Zwischen zwei Magneten besteht eine Wechselwirkung (vgl. hierzu Abb. 6.5). 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.

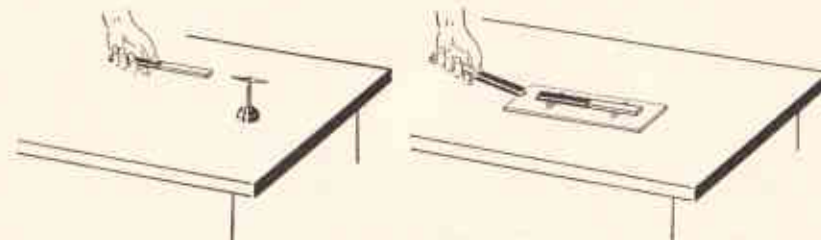


Abb. 6.5 – Wechselwirkung zweier Magnete

Aus der soeben gewonnenen Erkenntnis ergibt sich das magnetische Grundgesetz:

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

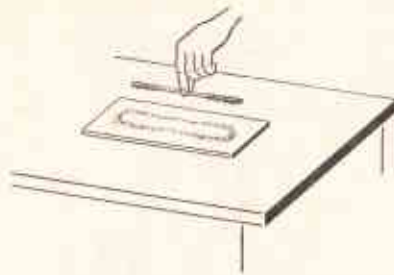


Abb. 6.6 – Untrennbarkeit von Magnetpolen

Wir wollen jetzt statt des Stabmagneten eine magnetisierte Stricknadel verwenden und sie mit feinen Eisenfeilspänen bestreuen (Abb. 6.6). 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 durchtrennen 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.

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:

- Zu jedem magnetischen Nordpol gehört ein magnetischer Südpol,
- eine Trennung der Magnetpole ist nicht möglich (wie etwa eine Trennung von positiven und negativen elektrischen Ladungen),
- beide Magnetpole sind gleich stark,
- es gibt keinen Überschuß von magnetischen Nord- oder Südpolen,
- jeder Magnet muß aus einer Vielzahl von Teilmagneten bestehen (siehe Teilung der Stricknadel).

Diese Teilmagnete werden als Molekularmagnete bezeichnet.

6.1.3. Das magnetische Feld

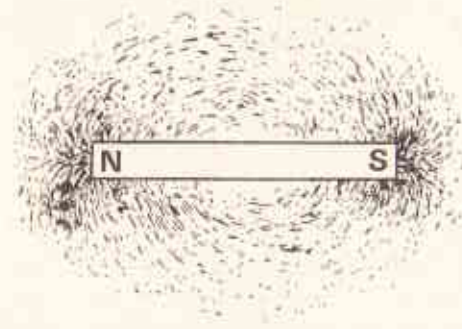


Abb. 6.7 – Feldlinienbild eines Stabmagneten

Im Versuch nach Abb. 6.7 wird auf einen Stabmagneten eine Glasplatte 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.

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

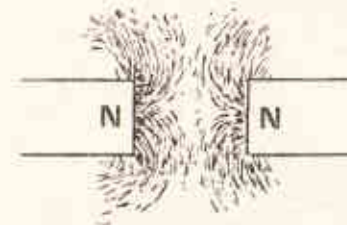


Abb. 6.8 – Gleichnamige Pole

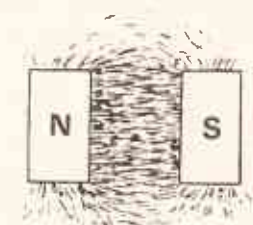


Abb. 6.9 – Ungleichnamige Pole

Die in Abb. 6.5 gezeigte Wechselwirkung zweier Magneten wird durch die in den Abb. 6.8 und 6.9 gezeigten Feldlinienbilder verdeutlicht. Während sich beim Gegenüberstehen gleichnamiger Pole die Feldlinien abstoßen, gehen sie beim Gegenüberstehen ungleichnamiger Pole ineinander über (sie ziehen sich gegenseitig an).

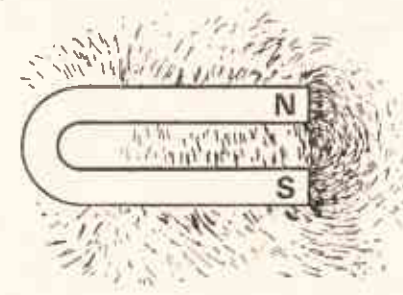


Abb. 6.10 – Feldlinienbild eines Hufeisenmagneten

Abb. 6.10 zeigt den Feldlinienverlauf bei einem Hufeisenmagneten. Zwischen den Schenkeln des Magneten erkennen wir parallel verlaufende, nicht strömende 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 aufgelockelter, 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 homogenes¹⁾ 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.

6.2. Elektromagnetismus

6.2.1. Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

Ein Leitungsdraht wird nach Abb. 6.11 über einer Magnetonadel in Nord-Süd-Richtung, also in der gleichen Lage wie die Magnetonadel, angeordnet. Schließen wir nun kurzzeitig den Stromkreis, so stellen wir fest, daß die Magnetonadel 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 Magnetonadel, so stellen wir fest, daß das magnetische Feld den stromdurchflossenen Leiter ganz umhüllt, wie etwa ein Ring. Man spricht deshalb auch

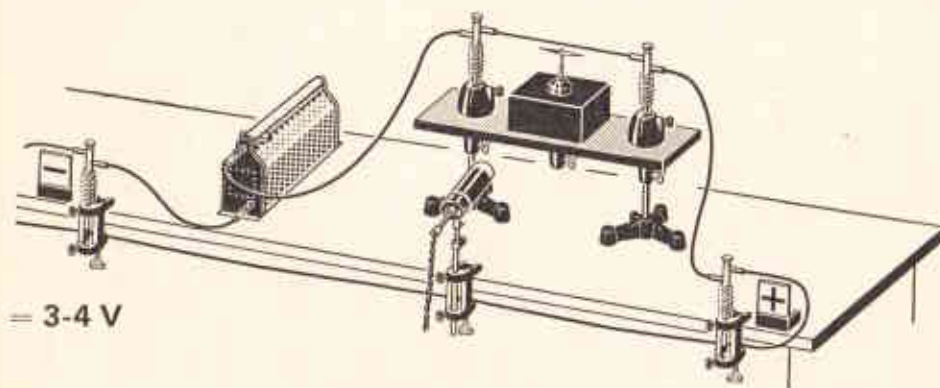


Abb. 6.11 – Magnetische Wirkung des elektrischen Stroms

von einem Ringfeld. Blickt man bei der Untersuchung des Feldes in Richtung des fließenden Stroms auf die Nadel, so weicht ihr Nordpol stets nach links herum (dem Uhrzeigersinn entgegen) 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⁾ homogen (griech.) = gleichartig

6.2.1.1. 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 hersehen, erscheint das Leitwerk 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 $\odot$.

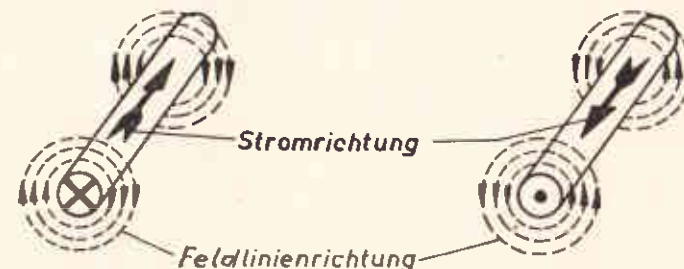


Abb. 6.12 – Feldlinienrichtung um einen stromdurchflossenen Leiter

Wenn wir in die Richtung des fließenden Stroms sehen (hinter dem Pfeil her), so laufen die Feldlinien des um den Leiter befindlichen Magnetfeldes rechtsherum (im Uhrzeigersinn) (Abb. 6.12, links). Sicht man gegen die Richtung des Stroms (dem Pfeil entgegen), so verlaufen die Feldlinien des Feldes linksherum (entgegen dem Uhrzeigersinn) (Abb. 6.12, rechts).

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

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

6.2.2. 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?

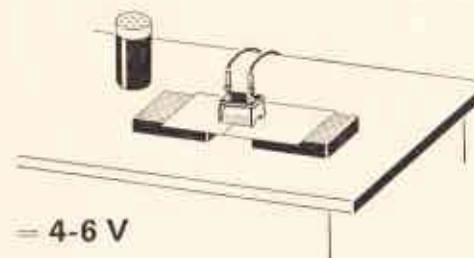


Abb. 6.13 – Demonstration des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule

Wir streuen bei dem Versuch nach Abb. 6.13 Eisenfeilspäne auf ein Stück Karton, das in den freien Raum der Spule hineinragt. Nach dem Einschalten des Stroms erhalten wir ein magnetisches Feld nach dem Schema der Abb. 6.14. Untersuchen wir das magnetische Feld mit Hilfe einer Magnetonadel, so stellen wir am Anfang der Spule einen Südpol und am Ende der Spule einen Nordpol fest.

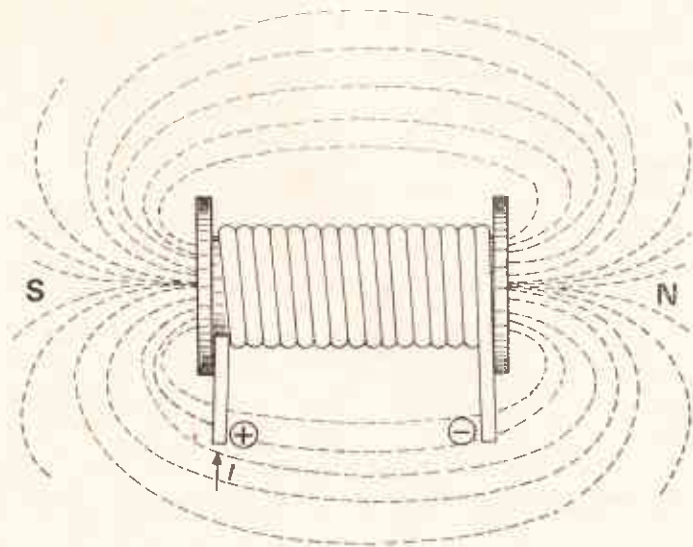


Abb. 6.14 – Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule mit Lufthohlraum

Beim Vergleich dieses Feldlinienbildes mit dem eines Stabmagneten stellt man eine Übereinstimmung der beiden Bilder fest (vgl. hierzu Abb. 6.7).

6.2.2.1. Die Feldlinienrichtung um eine stromdurchflossene Spule mit Lufthohlraum

In Abb. 6.15 ist der Querschnitt der Spule schematisch dargestellt. Die Querschnittsflächen des Leiters sind als kleine schraffierte Kreise gezeichnet, in denen die Stromrichtung durch ein Kreuz $\otimes$ oder einen Punkt $\odot$ angegeben ist (vgl. hierzu Abb. 6.12). Mit Hilfe der Stromrichtungsangabe und der Korkenzieherregel können wir festlegen, in welcher Richtung die Feldlinien des zu jedem Leiterabschnitt gehörigen magnetischen Feldes verlaufen.

Die Feldlinien der oberen Leiterquerschnittsflächen verlaufen links herum, die der unteren rechtsherum. Dabei zeigt sich, daß sich die Feldlinien zwischen den einzelnen Windungen der Spule in ihrer Wirkung aufheben, da sie hier gegeneinander gerichtet sind (hohle Pfeile). Dagegen sind die Feldlinien im Spulenhohlraum und außerhalb der Spule gleichgerichtet, so daß sie sich in ihrer Wirkung ergänzen. Somit ergibt sich für die stromdurchflossene Spule ein resultierendes Magnetfeld mit dem Nordpol rechts (Austritt der Feldlinien) und dem Südpol links (Eintritt der Feldli-

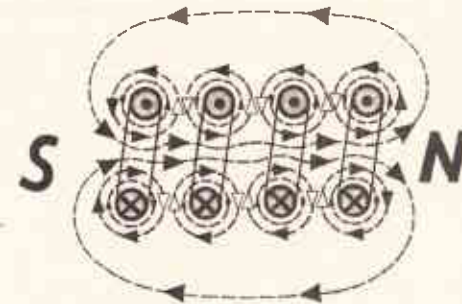


Abb. 6.15 – Feldlinienrichtung (schematisch)

nien). Zwei einfache Hilfsmittel zur Bestimmung der Richtung des Feldlinienverlaufs einer Spule sind:

- a) die **Korkenzieher-Regel**,
die wir schon im Abschn. 6.2.1.1 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.

6.3. 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. Hinsichtlich ihrer Wirkungen sind Dauermagnetfeld und Elektromagnetfeld völlig gleichartig.

Danach gilt:

- a) Sobald sich eine elektrische Ladung bewegt, also Strom fließt, bildet sich ein magnetisches Feld aus,
- b) Bewegungsrichtung der Ladungsträger und Feldlinienrichtung stehen immer rechtwinklig zueinander,
- c) eine Umkehrung der Bewegungsrichtung (Stromrichtung) hat eine Umkehrung der Feldlinienrichtung zur Folge.

Die Verknüpfung zwischen elektrischem und magnetischem Feld wird als elektromagnetisches Feld bezeichnet (vgl.: 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.

keit 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. 6.16 ableiten:

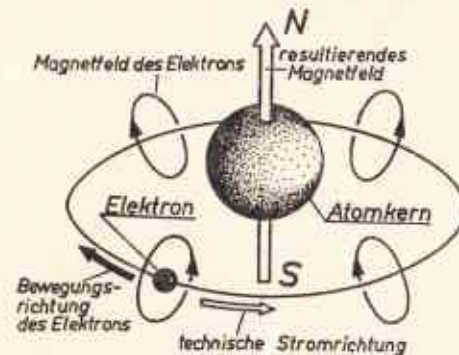


Abb. 6.16 – Elektronenbewegung und Magnetfeld im Atom

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 auch nach außen hin wirksamen Gesamtmagnetfeld.

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

Die Elektronen drehen sich übrigens auch um die eigene Achse – ähnlich wie die Erde. Man spricht dabei vom Elektronenspin¹⁾.

Die Ausrichtung der Elektronenbahnen gelingt je nach Art des Stoffs mehr oder weniger. Maßgebend dafür ist die Art der Bindung von Atomen innerhalb des Stoffs. 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.

¹⁾ Spin = Drehimpuls der Elementarteilchen im Atom

Man nennt sie ferromagnetische¹⁾ Werkstoffe.

So sind z. B. Eisen-Legierungen, wie Mu-Metall, im Vergleich zu nahezu unmagnetischen Werkstoffen bis zu etwa 100000mal stärker magnetisierbar.

Dagegen sind Metalle, wie Aluminium, Platin oder Chrom, nur 1,00002- bis 1,0003mal stärker als Luft magnetisierbar. Man nennt diese geringe magnetische Eigenschaft **paramagnetisch**. Es gibt aber auch Stoffe, die sich etwas schlechter als Luft magnetisieren lassen. Dazu gehören Wismut, Silber, Blei und Kupfer. Man bezeichnet deren magnetisches Verhalten als **diamagnetisch**.

Dia- und paramagnetische Werkstoffe dienen in der Hochfrequenztechnik zum Spulenabgleich, da bei hohen Frequenzen bereits geringe Veränderungen an der Spule große Änderungen im Frequenzverhalten bewirken.

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 Elektronenbewegungen 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 Stoffs 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.

6.4. Eisen im Magnetfeld

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

¹⁾ ferrum (lateinisch) = Eisen

In einem unmagnetisierten Eisenstück liegen die Molekularmagnete völlig willkürlich zueinander, etwa so, wie es in Abb. 6.17 dargestellt ist. Die Wirkung der einzelnen Molekularmagnete wird nach außen hin gegeneinander aufgehoben.

Unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes – beispielsweise durch Bestreichen einer Stricknadel mit einem Magneten – werden die Molekular-



Abb. 6.17 – Ungeordnete Lage der Molekularmagnete

magnete ausgerichtet. Das geschieht um so vollständiger, je stärker das äußere Magnetfeld ist. Liegen – wie in Abb. 6.18 – alle Molekularmagnete in der gleichen aufgezwungenen Richtung, so ist eine weitere Steigerung der jetzt auftretenden magnetischen Wirkung trotz stärkeren Einflusses durch ein äußeres Magnetfeld nicht mehr möglich.

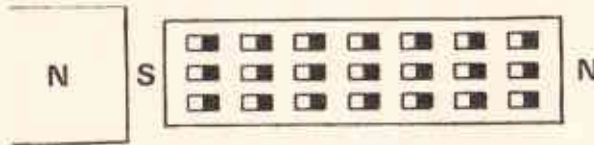


Abb. 6.18 – Lage der Molekularmagnete bei der Beeinflussung durch einen Dauermagneten

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 aufgezwungenen 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. 6.19 ein Stück Eisen zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten, legen ein Stück Zeichenkarton darüber und bestreuen ihn mit Eisenfeilspänen und klopfen vorsichtig an den Karton. Dabei zeigt sich das in Abb. 6.19 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 zusam-

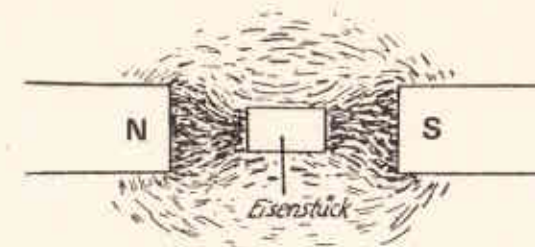


Abb. 6.19 – Feldlinienbild nach dem Einbringen von Eisen in das Magnetfeld

men, 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 noch einmal zurück.

6.4.1. Die magnetische Influenz

Bei einem Versuch nach Abb. 6.20 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.

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.

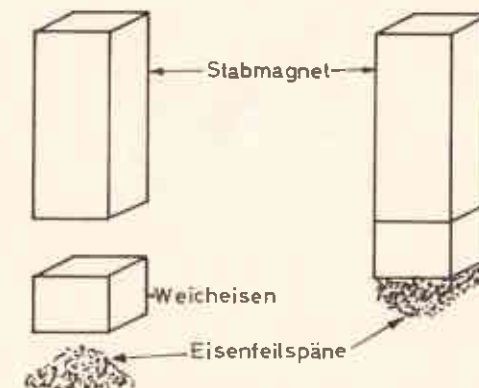


Abb. 6.20 – Magnetische Influenz

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**¹⁾.

Eine wesentliche Erscheinung der Influenz ist die Tatsache, daß ein weichmagnetischer Werkstoff von einem Dauermagneten grundsätzlich angezogen wird. Es tritt also ausschließlich eine anziehende Kraftwirkung auf, einerlei ob der Nordpol oder der Südpol des Dauermagneten dem weichmagnetischen Werkstoff gegenübersteht. Durch die Ausrichtung der Molekularmagnete entsteht im weichmagnetischen Werkstoff immer ein zum Dauermagneten entgegengesetzter (ungleichnamiger) Pol.

Die magnetische Influenz hat für Bauteile, die elektromagnetisch betrieben werden, große Bedeutung. So sind beispielsweise Relais mit Weicheisenanker nicht stromrichtungsempfindlich (neutral), dagegen Relais mit Dauermagnetanker stromrichtungsempfindlich (polarisiert).

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**²⁾ genannt.

6.4.2. Die magnetische Abschirmung

Im folgenden Versuch soll das Feldlinienbild dargestellt werden, wenn sich ein Weicheisenring zwischen den Polen eines Dauermagneten befindet. Wir legen

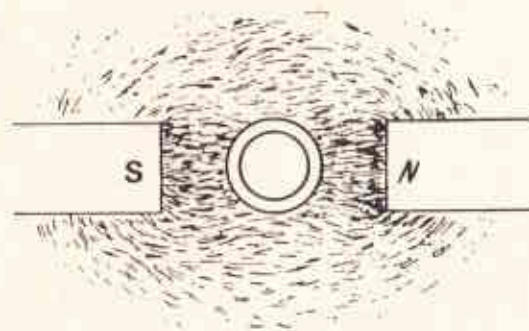


Abb. 6.21 – Schirmwirkung eines Eisenrings

¹⁾ Influenz = Beeinflussung

²⁾ remanere (lat.) = zurückbleiben

wieder über die Anordnung gemäß Abb. 6.21 ein Stück Karton und bestreuen ihn mit Eisenfeilspänen.

Das entstehende Feldlinienbild zeigt, daß die Feldlinien wie im Versuch nach Abb. 6.19 wieder zum größten Teil durch den Eisenring verlaufen. Hier ist jedoch interessant, daß der Raum innerhalb des Rings völlig frei von Feldlinien bleibt.

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.

6.5. Die Größen des magnetischen Feldes

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.

Was liegt näher, als zunächst einmal zu untersuchen, wovon überhaupt die Stärke eines Magnetfelds abhängig ist. Die Stärke eines Magnetfelds läßt sich z. B. anhand der Kraft nachweisen, mit der Eisen angezogen wird. Leider hängt aber die Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf Eisen von einer ganzen Reihe von Einflüssen ab, z. B. Abstand zwischen Spule und Eisen, Art und Abmessungen des Eisenkerns, Vormagnetisierung des Eisens usw. Hinzu kommt, daß die Kraftwirkung einer Spule quadratisch mit der Windungszahl und der Stromstärke zunimmt. Somit ist eine Kraftmessung zwar ungenau und läßt keine meßtechnische Auswertung zu. Sie ist jedoch so einfach und anschaulich, daß die zu beweisenden Zusammenhänge durch die Versuchsergebnisse deutlich bestätigt werden.

Bei den folgenden Versuchen werden die stromdurchflossenen Spulen senkrecht gestellt und die Kraftwirkung mit Hilfe einer Federwaage gemessen, an der ein kleiner Weicheisenkern hängt. Es genügt, wegen der Ungenauigkeiten zu ermitteln, ob die Kraftwirkung zu- oder abnimmt.

6.5.1. Die elektrische Durchflutung Θ

Bei dem Versuch nach Abb. 6.22 wird eine Spule mit 1200 Windungen zunächst von einem Gleichstrom der Stärke 1 A und danach von 2 A durchflossen. Mißt man die Kraft, mit der ein Eisenkern von der stromdurchflossenen Spule angezogen wird, so ergibt sich:

Die Wirkung des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule mit Luft-hohlraum wächst mit der Stromstärke.

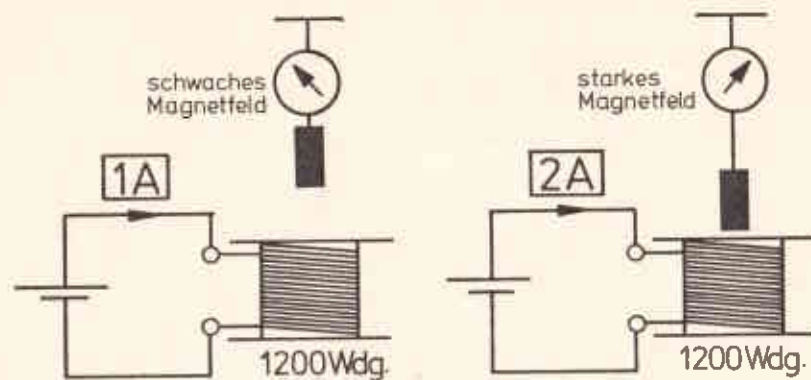


Abb. 6.22 – Die Stärke des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule
in Abhängigkeit von der Stromstärke

Ein weiterer Versuch nach Abb. 6.23 soll den Einfluß der Windungszahl einer Spule auf die magnetische Wirkung veranschaulichen. Dabei werden Spulen mit 600 bzw. 1200 Windungen verwendet. Jede wird von der gleichen Stromstärke durchflossen, was sich im Versuchsaufbau am einfachsten durch die Reihenschaltung der Spulen erreichen läßt.

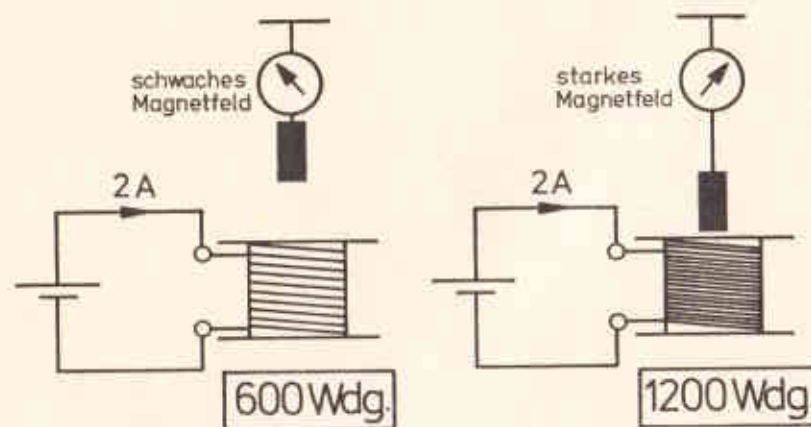


Abb. 6.23 – Die Stärke des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule
in Abhängigkeit von der Windungszahl

Der Versuch zeigt:

Mit steigender Windungszahl einer stromdurchflossenen Spule mit Luft-hohlraum nimmt die Wirkung ihres Magnetfelds zu.

Anhand der Versuche nach den Abb. 6.22 und 6.23 haben wir erkannt, daß die Stärke des Magnetfelds 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 **elektrische Durchflutung** bezeichnet. Als Formelzeichen wird dafür der griechische Buchstabe Theta gesetzt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
elektrische 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:

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

In dieser Formel bedeuten,

- Θ = elektrische Durchflutung in A,
- I = Stromstärke in A und
- N = Windungszahl, Einheit 1.

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

(Eine Zusammenstellung der magnetischen Größen finden Sie am Schluß dieses Abschnitts.)

Beispiel:

Ein Relais mit 2500 Windungen wird von einem Strom der Stärke 80 mA durchflossen. Wie groß ist die elektrische 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 elektrische Durchflutung beträgt 200 Ampere(windungen).

6.5.2. Die magnetische Feldstärke H

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

Dazu wird die Kraftwirkung zweier übereinander gestellter und in Reihe geschalteter Spulen zu je 600 Windungen mit der Kraftwirkung einer Spule mit 1200 Windungen verglichen. Für beide muß – damit sonst gleiche Bedingungen herrschen – die gleiche Stromstärke eingestellt werden, was sich wieder am einfachsten durch eine Reihenschaltung verwirklichen läßt.

Die Spulen werden also von der gleichen Stromstärke durchflossen, besitzen die gleiche Windungszahl und sind nur verschieden lang. Es zeigt sich, daß die Kraftwirkung der beiden in Reihe geschalteten Spulen mit je 600 Windungen erheblich kleiner ist als die einer nur halb so langen Spule mit 1200 Windungen.

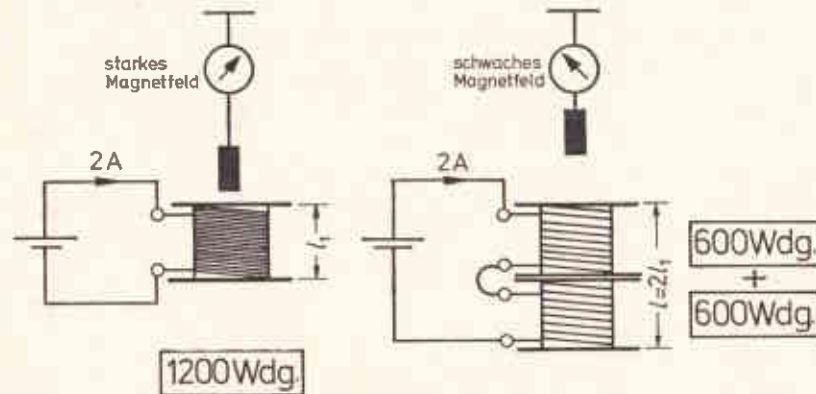


Abb. 6.24 – Die Stärke des Magnetfelds einer stromdurchflossenen Spule in Abhängigkeit von der Spulenlänge

Wir erkennen:

Die Wirkung des Magnetfelds 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	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$

In eine Formel gebracht ergibt sich:

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

In dieser Formel bedeuten:

- I = Stromstärke in Ampere,
- N = Windungszahl, Einheit 1,
- l = Spulenlänge bzw. mittlere Feldlinienlänge in Meter und
- H = magnetische Feldstärke in Ampere pro Meter.

Es wird 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: $H = \frac{I \cdot N}{l}$

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

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

2. Beispiel:

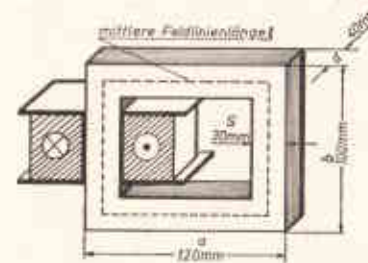


Abb. 6.25

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 :

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

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

Die magnetische Feldstärke beträgt $375 \frac{\text{A}}{\text{m}}$.

6.5.3. Die Permeabilität μ

Wir haben an einfachen Versuchen im Abschn. 6.4 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:

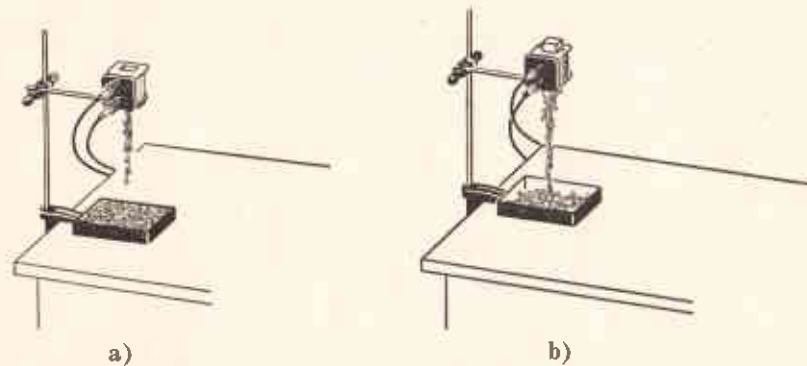


Abb. 6.26 – Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule
a) ohne und b) mit Eisenkern

Nach Abb. 6.26 werden wir zunächst einer eisenfreien Spule eine Anzahl Eisennägel nähern. Die Nägel werden zum Teil in die Spule hineingezogen oder haften aneinander, sobald der Strom eingeschaltet wird. Bei Unterbrechung des Stromzuflusses fallen alle Nägel wieder zurück. Nach Abb. 6.26b 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 Stroms 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 für den Magnetismus des Kerns schlechter wird, je stärker dieser vormagnetisiert ist.

Die Permeabilitätszahl ist eine Vergleichszahl. Sie gibt an, wievielfach besser das betreffende Kernmaterial magnetisch leitfähig ist als der luftleere Raum. Man bezeichnet diese Vergleichszahl daher als Permeabilitätszahl.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Permeabilitätszahl	μ_r	1

Die Permeabilitätszahl 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 (Vakuum) setzt man die sog. magnetische Feldkonstante μ_0 .

Begriff	Formelzeichen	Einheit
magnetische Feldkonstante	μ_0	$\frac{Vs}{Am}$

Die magnetische Feldkonstante μ_0 hat den Wert $1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$.

Die Permeabilität μ ergibt sich aus dem Produkt

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \frac{Vs}{Am}$$

In dieser Formel bedeuten:

$$\mu = \text{Permeabilität in } \frac{Vs}{Am},$$

$$\mu_0 = \text{magnetische Feldkonstante} = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \text{ und}$$

$$\mu_r = \text{Permeabilitätszahl, Einheit 1.}$$

Da μ_r für Luft den Wert 1 hat, ergibt sich für das Vakuum wie für Luft die gleiche Permeabilität. Die magnetische Feldkonstante wird für die Berechnung von magnetischen Flußdichten für Stromspulen mit Lufthohlraum bzw. mit unterbrochenem Kern verwendet.

6.5.4. Die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion B

In den vorstehenden Abschnitten haben wir die Größen, die einen Einfluß auf die Wirkung des Magnetfelds haben, kennengelernt. Jetzt wollen wir 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: $\frac{100\,000\,000 \text{ Feldlinien}}{1 \text{ m}^2} = \text{Tesla}^1) \text{ (T)}.$

Früher galt: $\frac{1 \text{ Feldlinie}}{1 \text{ cm}^2} = 1 \text{ Gauß}^2) \text{ (G)}.$

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)

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

Um die Größe B anhand der Wirkungen eines Magnetfelds abzuleiten, kann man wie folgt verfahren, 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 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 wirk-samer 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
$B = \frac{F}{I \cdot l}$	$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m}} = \frac{1 \text{ Nm}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{1 \text{ Ws}}{\text{Am}^2} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{Am}^2} = \frac{1 \text{ Vs}}{\text{m}^2}$

Dafür sind folgende Beziehungen anzuwenden:

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

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

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 m/s Geschwindigkeit und 1 V Induktionsspannung, so muß das Magnetfeld die magnetische Induktion 1 Tesla haben.

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 Magnetfelds befindet.

Größengleichung

$$B = \frac{U}{l \cdot v}$$

Einheitengleichung

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

Nach beiden Ableitungen erhalten wir also für

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

Die abgeleitete Einheit läßt die Berechnung elektrischer Größen aus magnetischen Größen zu.

Die magnetische Flußdichte B des Erdmagnetfelds beträgt in Deutschland nur $0,43 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{ T}$. Sehr viel stärker ist die magnetische Flußdichte dagegen z.B. im Luftspalt eines Lautsprechers. Sie liegt etwa zwischen $0,8$ und $1,2 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ oder $0,8$ und $1,2 \text{ T}$.

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

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

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

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad \text{T}$$

In dieser Formel bedeuten:

B = magnetische Flußdichte in T,

μ_0 = magnetische Feldkonstante in $\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$,

μ_r = Permeabilitätszahl, Einheit 1 und

H = magnetische Feldstärke in $\frac{\text{A}}{\text{m}}$.

Hinweis:

Die oben abgeleitete Formel zur Berechnung der magnetischen Flußdichte B läßt sich in dieser Form nur anwenden, wenn μ_r als Konstante (z. B. für Luft: $\mu_r = 1$) anzusehen ist. Da die Permeabilitätszahl 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 Abschn. 6.6 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 $0,8 \text{ A}$ 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: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

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

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

$$B = 30168 \cdot 10^{-6} \text{ T} \approx \underline{\underline{0,0302 \text{ T}}} = 30,2 \text{ mT.}$$

Die magnetische Flußdichte beträgt $0,0302 \text{ Tesla}$.

6.5.5. 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	Wb (Weber ¹)

Als Formel ergibt sich:

$$\Phi = B \cdot A \quad \text{Wb}$$

In dieser Formel bedeuten:

Φ = magnetischer Fluß in Wb,

B = magnetische Flußdichte in T und

A = Polfläche in m^2 .

Mit Hilfe einer Einheitengleichung erhält man folgendes Ergebnis:

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

Zwischen der früher gebräuchlichen Einheit Maxwell²) und dem Weber besteht folgender Zusammenhang:

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

Beispiel:

Die magnetische Flußdichte einer Spule mit Lufthohlraum beträgt $B = 30 \text{ mT}$. Der Querschnitt des Lufthohlraums ist $A = 4 \text{ cm}^2$. Welchen Wert hat der magnetische Fluß im Spulenraum?

Gegeben: $B = 30 \text{ mT}$; $A = 4 \text{ cm}^2$

Gesucht: Φ

¹) Weber = deutscher Physiker, 1804–1891.

²) Maxwell = englischer Physiker, 1831–1879.

$$\text{Lösung: } \Phi = B \cdot A = \frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{\text{m}^2}$$

$$\Phi = 30 \cdot 4 \cdot 10^{-7} = 120 \cdot 10^{-7}$$

$$\Phi = 12 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} = \underline{\underline{12 \mu\text{Wb}}}$$

Der magnetische Fluß beträgt $\Phi = 12 \mu\text{Wb}$.

6.6. Hystereseschleife und Magnetisierungskurve

6.6.1. 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. 6.27).

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 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 Werkstoffs.

¹) coercere (lat.) = zügeln

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

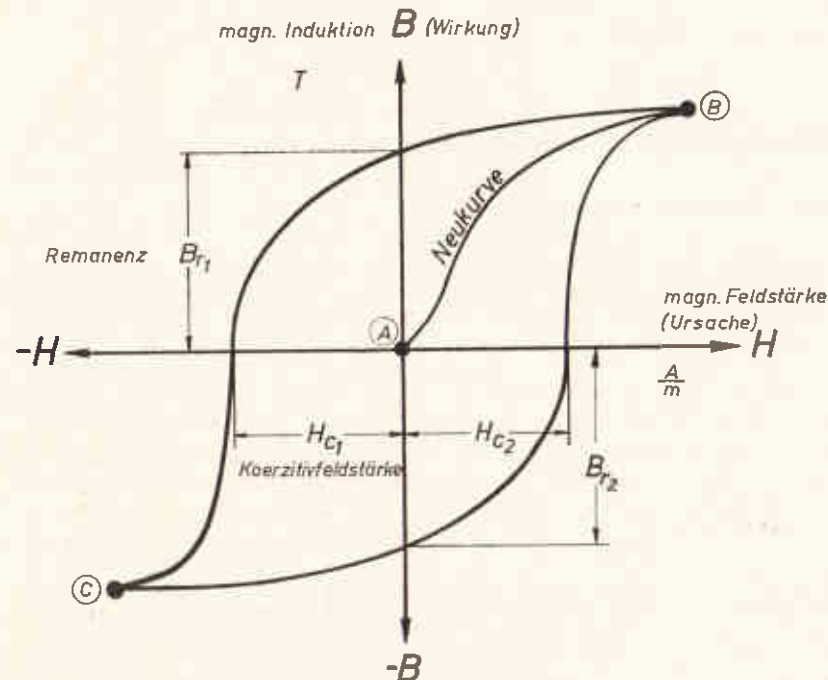


Abb. 6.27 – Hystereseschleife

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).

Würde die Spule von einem Wechselstrom durchflossen, so würde die dadurch bewirkte periodische Ummagnetisierung des Eisenkerns entsprechend 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 Werkstoffs in einem wechselnden Magnetfeld großemäßig 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. 6.28).

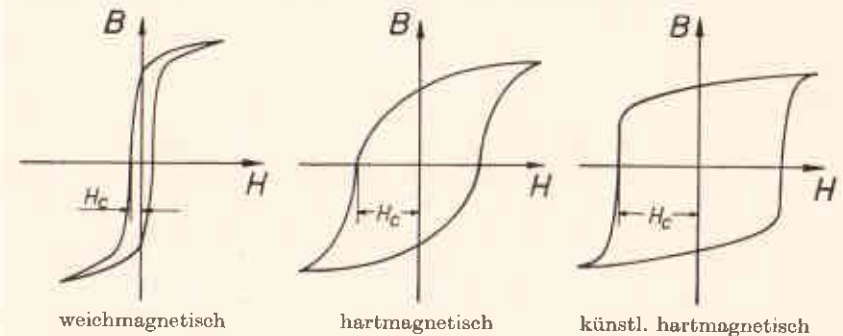


Abb. 6.28 – Hystereseschleife verschiedener ferromagnetischer Werkstoffe

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

$$\begin{aligned} \text{Fläche} &= \text{Breite} \cdot \text{Höhe} \\ &= \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

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

6.6.2. 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.

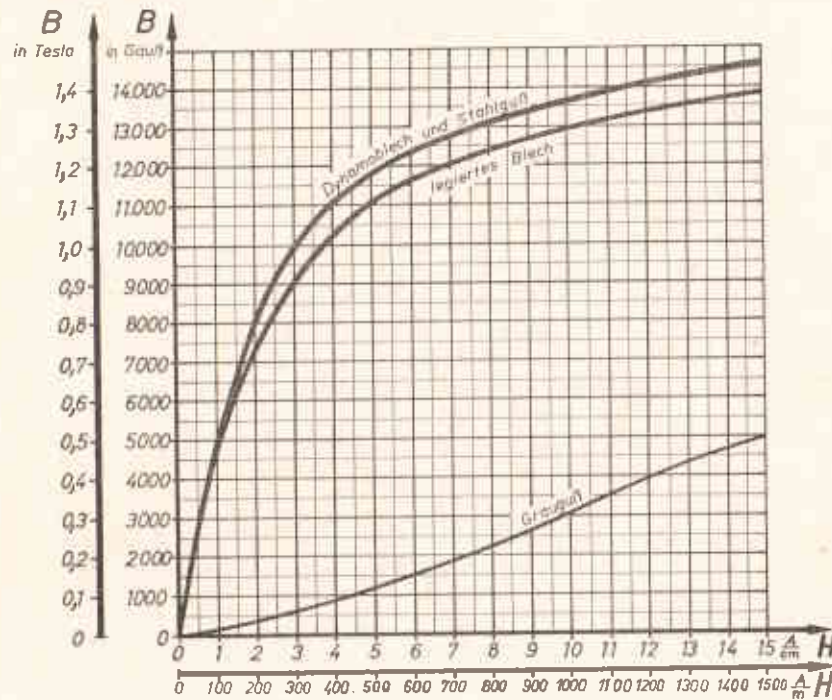


Abb. 6.29 – Magnetisierungskurven

In Abb. 6.29 sind Magnetisierungskurven für einige gebräuchliche Eisensorten dargestellt. Sie dienen auch als Grundlage für die Übungsbeispiele. Anhand der Magnetisierungskurven läßt sich auch die Permeabilitätszahl 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 (vgl. hierzu Beispiel 2 am Ende dieses Abschnitts).

Da die magnetische Induktion B in technischen Unterlagen vielfach noch in der Einheit Gauß angegeben wird, sind die Achsen des Diagramms jeweils nach der MKSA-Einheit und der älteren Einheit unterteilt. Bei der vereinfachten Berechnung magnetischer Kreise muß zwischen drei Arten der Spulenanordnung unterschieden werden:

a) Spulen mit Lufthohlraum (ohne Kern)

Für Spulen mit Lufthohlraum wird die magnetische Feldstärke bzw. magnetische Flußdichte annähernd genau bestimmt, wenn für

l = Spulenlänge und

$$\mu = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \text{ eingesetzt werden.}$$

b) Spulen auf geschlossenem ferromagnetischem Kern

Bei der Berechnung der magnetischen Feldstärke H ist hier die mittlere Feldlinienlänge im geschlossenen Kern zu berücksichtigen. Da μ_r des ferromagnetischen Stoffs kein konstanter Wert ist, verwendet man zur Ermittlung der magnetischen Flußdichte B die Magnetisierungskurve des betreffenden Materials.

Hier gilt also:

l = mittlere Feldlinienlänge im Kern;

μ_r = muß anhand der Magnetisierungskurve berücksichtigt werden.

c) Spulen auf ferromagnetischem Kern mit Luftspalt

Diese Art findet man in der Praxis sehr häufig, z.B. in Relais, Übertragern, Drosselspulen, Lautsprechern usw. Die Permeabilitätszahl ferromagnetischer Stoffe ist im allgemeinen um mehr als den Faktor 1000 größer als die von Luft. Der magnetische Widerstand des Luftspalts ist somit mindestens 1000-mal größer als der magnetische Widerstand des Spulenkerns. Zur Berechnung magnetischer Kreise mit Luftspalt vernachlässigt man daher den Einfluß des ferromagnetischen Kerns und berücksichtigt nur die Länge und Permeabilität des Luftspalts.

Eine ähnliche „Vernachlässigung von Widerstandswerten“ ist auch beim Gleichstromkreis üblich. Zur Berechnung der Stromstärke in einem Gleichstromkreis mit Spannungsquelle und Verbraucher berücksichtigen wir normalerweise nicht den Widerstand der Leitungen zwischen Spannungsquelle und Verbraucherwiderstand; denn der Leitungswiderstand ist in Verhältnis zum Verbraucherwiderstand meistens so klein, daß wir ihn bei der üblichen Rechengenauigkeit vernachlässigen können.

Die Berechnung magnetischer Kreise mit Luftspalt führt daher zu ausreichend genauen Ergebnissen, wenn man die Luftspalllänge als Feldlinienlänge zugrunde legt. Somit gilt für Spulen mit unterbrochenem Kern:

l = Länge des Luftspalts,

$$\mu = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

Diese Vereinfachung ist jedoch nur zulässig, solange der ferromagnetische Kern noch nicht bis in den Sättigungsbereich vormagnetisiert worden ist.

1. Beispiel:

Auf dem geschlossenen Eisenkern aus legiertem Blech nach Abb. 6.30 befindet sich eine Spule mit 800 Windungen. Sie wird von einem Strom der Stärke 0,2 A durchflossen. Wie groß sind magnetische Induktion und magnetischer Fluß?

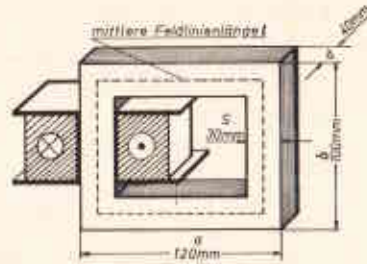


Abb. 6.30 – Spule mit geschlossenem Kern

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

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

mittlere Feldlinienlänge l :

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

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

Zur Bestimmung der magnetischen Induktion B suchen wir in der Magnetisierungskurve auf der waagerechten Achse den Punkt für $H = 500 \text{ A/m}$. 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 waagrecht nach links und lesen auf der senkrechten Achse den zugehörigen Wert für B ab. Es ergibt sich ein Wert von 1,1 Tesla. Die magnetische Induktion beträgt somit 1,1 T.

Die Permeabilitätszahl des Kerns beträgt für diesen Magnetisierungszustand:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad \text{umstellen nach } \mu_r! \\ \mu_r &= \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{1,1 \text{ Vs/m}^2}{1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am} \cdot 500 \text{ A/m}} \\ \mu_r &= \frac{1,1 \cdot 10^6}{1,257 \cdot 500} = \frac{11000}{1,257 \cdot 5} = \underline{\underline{1750}} \end{aligned}$$

Das bedeutet: der Kern aus legiertem Dynamoblech leitet den magnetischen Fluß bei diesem Magnetisierungszustand 1750mal besser als Luft.

$$\Phi = B \cdot A$$

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

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

Der magnetische Fluß beträgt 0,00132 Weber.

2. Beispiel:

Wie groß ist jeweils die Permeabilitätszahl für Dynamoblech bei einer magnetischen Feldstärke von:

$$\text{a) } H = 100 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad \text{b) } H = 1000 \frac{\text{A}}{\text{m}}?$$

Gegeben: $H_1 = 100 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; $H_2 = 1000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; 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 :

$$\text{Bei } H_1 = 100 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ beträgt } B_1 = 0,48 \text{ T,}$$

$$\text{bei } H_2 = 1000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ beträgt } B_2 = 1,36 \text{ T.}$$

$$\mu_{r1} = \frac{0,48}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 100} = \frac{480\,000}{125,7} \approx \underline{\underline{3820}}$$

$$\mu_{r2} = \frac{1,36}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = \frac{1\,360\,000}{1257} \approx \underline{\underline{1080.}}$$

Die Permeabilitätszahl des Dynamoblechs hat

$$\text{bei } H = 100 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ den Wert } 3820 \text{ und}$$

$$\text{bei } H = 1000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{ den Wert } 1080.$$

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

6.7. 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	elektrische 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 $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r =$ 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 $B = \frac{\Phi}{A}$

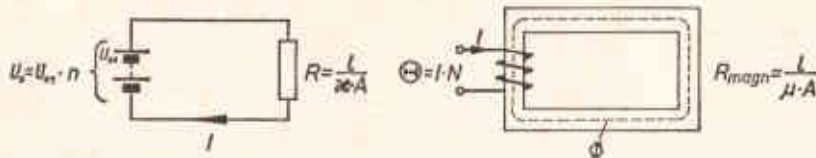


Abb. 6.31 – Elektrischer Stromkreis

Abb. 6.32 – Magnetischer Kreis

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 natürlich die für die Reihenschaltung von elektrischen Widerständen bekannte Formel $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$ sinngemäß anwenden.

6.8. Anwendungsbeispiele (Bauteile mit elektromagnetischer Wirkung)

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

6.8.1. Relais

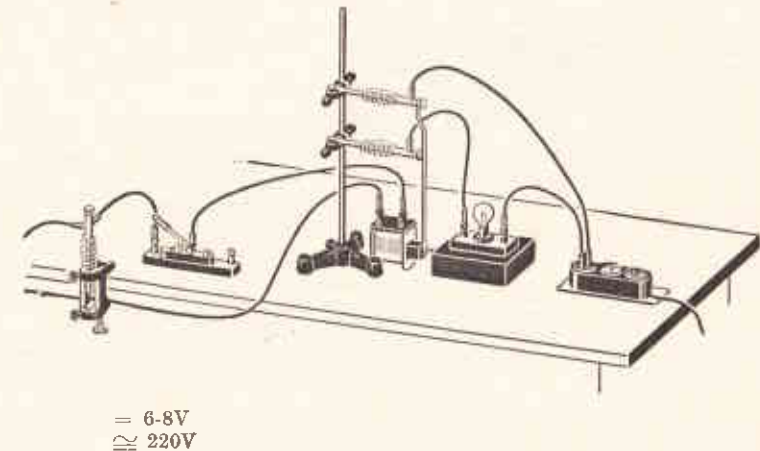


Abb. 6.33 – Relais (Versuchsaufbau)

Der Versuchsaufbau nach Abb. 6.33 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.

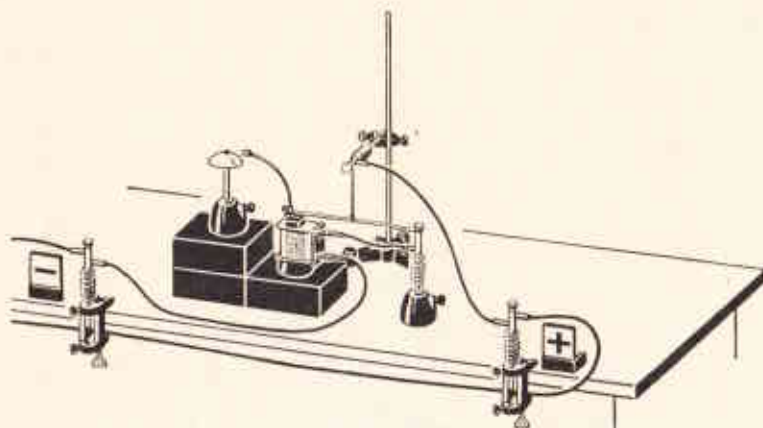
Dadurch wird die aus dem Netz (Starkstromkreis) gespeiste Glühlampe zum Leuchten gebracht. Der Schwachstrom muß gerade so groß sein, daß die Kraftwirkung des Elektromagneten groß genug ist, einen sicheren Kontaktschluß zu gewährleisten. Beim Ausschalten des Schwachstromkreises erlischt die Glühlampe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

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

6.8.2. Wecker

Der Aufbau dieses Versuchs ist dem nach Abb. 6.33 ähnlich. Abb. 6.35 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.



= 3-4 V

Abb. 6.34 – Gleichstromwecker (Versuchsaufbau)

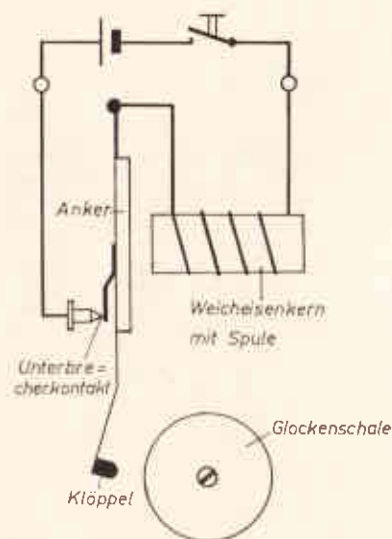


Abb. 6.35 – Gleichstromwecker (schematisch)

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 Klößel schlägt gegen die Glockenschale, die Feder hebt vom Kontakt ab usw. Die Vorgänge wiederholen sich so schnell, daß der Wecker ein rassendes Geräusch verursacht, das erst endet, wenn der Stromkreis von Hand wieder ausgeschaltet wird.

Ein Wecker mit einem Aufbau nach Abb. 6.34 und 6.35 wird als **Gleichstromwecker** bezeichnet. Er kann jedoch auch mit Wechselstrom betrieben werden (Hausklingel).

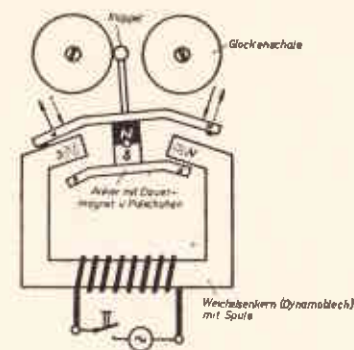


Abb. 6.36 – Wechselstromwecker

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 Klößel die Glocken (oder auch nur eine Glocke) zum Klingen.

6.8.3. Fernhörer

Die Versuchsanordnung nach Abb. 6.37 zeigt uns einen Fernsprechapparat, bei dem jedoch nur die Wirkungsweise des **Fernhörers** demonstriert werden soll.

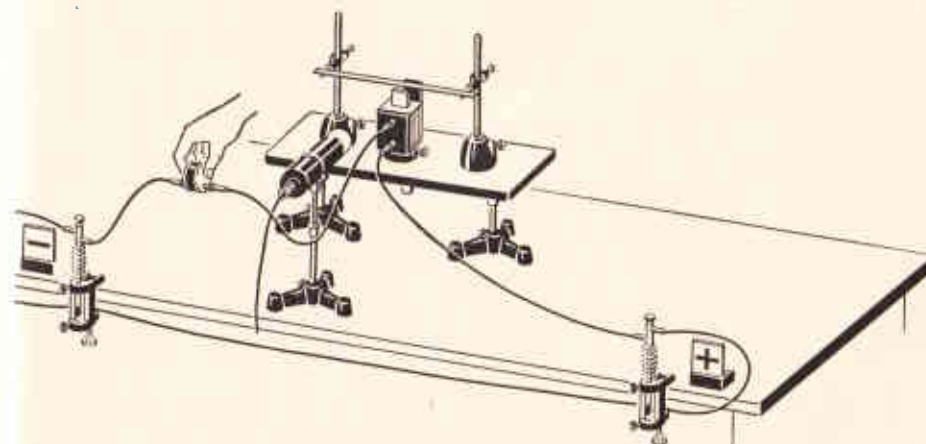


Abb. 6.37 – Fernhörer (Versuchsaufbau)

Abb. 6.36 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.

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.

Zusammenstellung der magnetischen Größen

Begriff	Formelzeichen	Benennung	Einheit	Kurzzeichen	Größengleichung
Elektrische Durchflutung	Θ	Amperewindung		A	$\Theta = I \cdot N$
Magnetische Feldstärke	H	Amperewindung pro Meter		$\frac{A}{m}$	$H = \frac{\Theta}{l}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	Henry ¹⁾ pro Meter		$\frac{H}{m}$	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$
Permeabilitätszahl	μ_r	Eins		1	—
Permeabilität	μ	Henry ¹⁾ pro Meter		$\frac{H}{m}$	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
Magnetische Flußdichte	B	Tesla		T	$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$
Magnetischer Fluß	Φ	Weber		Wb	$\Phi = B \cdot A$

Technische Einheiten: $1 T = 1 \frac{Vs}{m^2}$ $1 Wb = 1 Vs$ $1 H = 1 \frac{Vs}{A}$

¹⁾ Henry, Kurzzeichen H = Einheit für Induktivität (vgl. hierzu Abschn. 7.3.3.)

7. Wirkungen des Magnetismus

7.1. 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. Auf die Ableitung der für die Berechnung der Anzugskraft von Elektromagneten verwendeten Größengleichung muß in diesem Zusammenhang verzichtet werden. Die Anzugskräfte von Magneten können nach folgender Näherungsformel berechnet werden:

$$F \approx 40 \cdot 10^4 \cdot B^2 \cdot A \quad \text{N}$$

In dieser Formel bedeuten:

- F = Anzugskraft in N,
- B = magnetische Flußdichte in T und
- A = wirksame Polfläche in m^2 .

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

Wenn wir uns an die Ableitung der magnetischen Größen von der Kraftwirkung im Magnetfeld in dem Abschn. 6.5.4 erinnern, dann können wir für die vorstehende Näherungsformel leicht die Einheitengleichung aufstellen. Die genauere Größengleichung für die Anzugskraft im Magnetfeld lautet:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{\mu_0 \cdot 2} \quad \text{N}$$

In dieser Formel bedeuten:

- F = Anzugskraft in N,
- B = magnetische Flußdichte in T,
- A = wirksame Polfläche in m^2 ,
- μ_0 = magnetische Feldkonstante = $1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$,
- 2 = Divisor, mit dem die Kraftwirkung für einen Pol berücksichtigt wird, Einheit 1.

Die Einheitengleichung für diese Größengleichung lautet:

$$\text{N} = \frac{\left(\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}\right)^2 \cdot \text{m}^2}{\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1} = \frac{(\text{Vs})^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Am}}{\text{m}^4 \cdot \text{Vs}} = \frac{\text{Vs} \cdot \text{Am}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{N} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}} = \frac{\text{Nm}}{\text{m}} = \text{N} \quad (1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J})$$

Wird von der genaueren Größengleichung der Zahlenwert der magnetischen Feldkonstante von 1,257 auf 1,250 abgerundet, dann ergibt sich die oben angegebene Näherungsformel.

(Eine Zusammenstellung der magnetischen Größengleichungen finden Sie am Schluß dieses Abschnitts).

1. 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: $B = 0,8 \text{ T}$; $d = 3 \text{ mm}$

Gesucht: F

Lösung: $F = 40 \cdot 10^4 \cdot B^2 \cdot A$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,3 \text{ cm} \cdot 0,3 \text{ cm} \cdot \pi}{4} = 0,07065 \text{ cm}^2 = 0,07065 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = 40 \cdot 10^4 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,07065 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

$$F = \underline{\underline{1,81 \text{ N}}} (= 0,102 \cdot 1,81 \text{ kp} = 0,185 \text{ kp})$$

Der Anker des Haftrelais wird mit einer Kraft von 1,81 N ($\approx 185 \text{ p}$) gehalten.

2. Beispiel:

Zum sicheren Durchschalten der Kontakte muß der Anker eines Relais mit 1 N angezogen werden. Der Luftspalt hat eine Länge von 2,5 mm. Im Luftspalt stehen sich Anker und Kern auf einer Fläche von $1,2 \text{ cm}^2$ gegenüber. Die Wicklung hat 3000 Windungen Cu-Draht. Welche Mindeststromstärke ist erforderlich, damit das Relais anzieht? (Der magnetische Widerstand des Eisenkerns bleibt unberücksichtigt.)

Gegeben: $F = 1 \text{ N}$; $l_{\text{Luft}} = 2,5 \text{ mm}$; $A_{\text{Luft}} = 1,2 \text{ cm}^2$; $N = 3000$

Gesucht: I

Lösung: $B = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{I \cdot N}{l}$

$$I = \frac{B \cdot l}{\mu \cdot N}$$

$$F \approx 40 \cdot 10^4 \cdot B^2 \cdot A$$

$$B \approx \sqrt{\frac{F}{40 \cdot 10^4 \cdot A}} = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4}}} = \sqrt{0,0208}$$

$$B \approx 0,144 \text{ T}$$

$$0,144 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 0,0025 \text{ m}$$

$$I = \frac{0,144 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 0,0025 \text{ m}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 3000} = \underline{\underline{0,0955 \text{ A}}}$$

Zum Anzug des Relais ist eine Stromstärke von rd. 96 mA erforderlich.

7.2. Fremdinduktion

7.2.1. Induktion der Bewegung

Im Abschn. 6.3 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 Versuchs nach Abb. 7.1. 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 eingeriegelt 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:

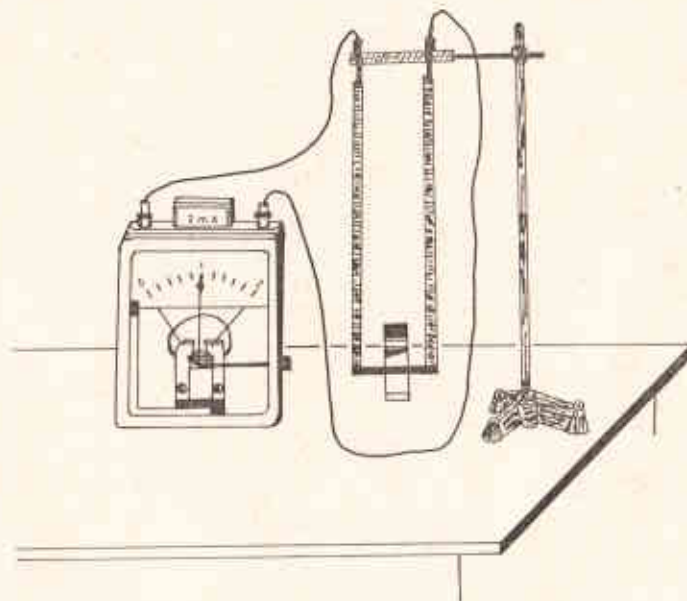


Abb. 7.1 – Stromerzeugung durch Induktion

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.

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.

7.2.1.1. Die Richtung der Induktionsspannung bzw. des Induktionsstroms der Bewegung

Anhand des Versuchs nach Abb. 7.1 haben wir gesehen, daß die Richtung des Induktionsstroms davon abhängt, in welche Richtung der Leiter sich bewegte und welche Richtung das Magnetfeld hatte. Wenn die Richtung des Magnetfelds, die Bewegungsrichtung des Leiters und die Richtung des Zeigeranschlages genau im Zusammenhang beobachtet werden, kann man anhand der Beobachtungsergebnisse eine Regel zur Bestimmung



Abb. 7.2 – Rechte-Hand-Regel

mung der Richtung des Induktionsstroms aufstellen, die sog. **Rechte-Hand-Regel**:

Läßt man die Feldlinien des Magnetfelds 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 Stroms (Abb. 7.2).

Die Richtung des Induktionsstroms steht immer rechtwinklig zur Feldlinienrichtung des ursächlichen Magnetfelds.

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. 7.1 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, das ist die Magnetfeldänderung, zu hemmen sucht.

Bei dem von uns untersuchten Vorgang ist die Ursache für die Entstehung des Induktionsstroms die durch Bewegung verursachte Änderung

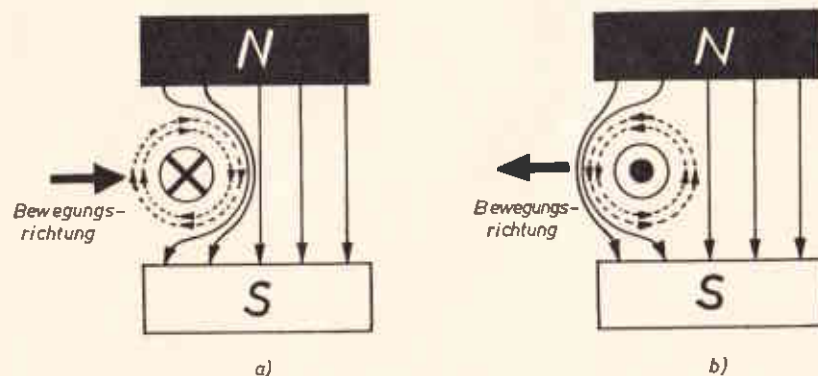


Abb. 7.3 – Richtung des Induktionsstroms

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 Induktionsstroms wird durch Abb. 7.3 erläutert:

Bei der Leiterbewegung nach rechts (Abb. 7.3a) wird ein Induktionsstrom erzeugt, dessen Magnetfeld auf der rechten Seite des Leiters mit dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet ist (Korkenzieherregel ergibt Stromrichtung). Anhand der Hilfspostellung 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. (Vgl.: Gleichnamige Pole stoßen sich ab.) Wird der Leiter nach links bewegt (Abb. 7.3b), 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.

7.2.1.2. Die Höhe der Induktionsspannung der Bewegung

Bei dem Versuch nach Abb. 7.4 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

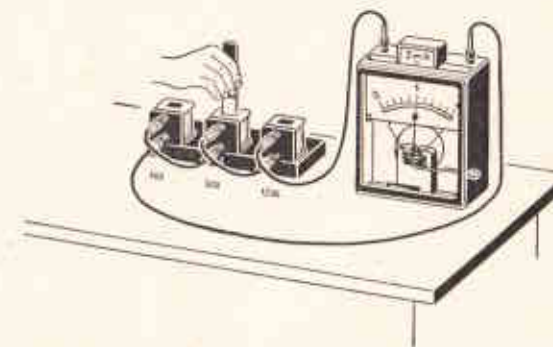


Abb. 7.4 – Die Höhe der Induktionsspannung in Abhängigkeit von der Leiterlänge (Windungszahl) und Schnelligkeit der Flußänderung

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 Stroms. Der angezeigte Strom aber ist allein von der Höhe der induzierten Spannung abhängig.

Wir stellen fest:

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

Wir wollen nun den Stabmagneten in die Spule mit den 1200 Windungen (Abb. 7.4) 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 Stahlstabs.

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 Magnetfelds um einen Leiter) hängt die Schnelligkeit der Flußänderung von der Bewegungsgeschwindigkeit v ab.

Wir können nun unsere Erkenntnisse zusammenfassen:

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

Als Formel ergibt sich:

Größengleichung

$$U = B \cdot l \cdot v \quad \text{V}$$

Einheitengleichung

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

In dieser Formel bedeuten:

- U = erzeugte Induktionsspannung in Volt (Höchstwert),
- B = magnetische Induktion in Tesla,
- l = wirksame Leiterlänge in m und
- v = Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters in $\frac{m}{s}$.

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

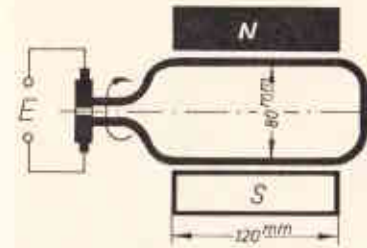


Abb. 7.5 – Wechselstromgenerator

Beispiel:

Eine Leiterschleife von 80 mm Durchmesser wird in einem Magnetfeld gedreht, dessen magnetische Induktion 0,8 Tesla beträgt.

Die Länge der Magnetpolschuhe beträgt 120 mm, die Drehzahl 750 U/min.

Wie hoch ist die in der Leiterschleife erzeugte Induktionsspannung?

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

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

Gesucht: U

Lösung: $U = B \cdot l \cdot v$

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

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

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

$$U = 0,8 \frac{Vs}{m^2} \cdot 0,24 \text{ m} \cdot 3,14 \frac{\text{m}}{s} = \underline{\underline{0,603 \text{ V}}}$$

Es wird eine Spannung von 0,603 V erzeugt.

7.2.2. Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)

Ursache für die Entstehung einer Induktionsspannung ist die Änderung des magnetischen Flusses um einen Leiter. Die Änderung des magnetischen Flusses um den Leiter braucht aber nicht durch die Bewegung des Leiters oder des Magnetfelds 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. 7.6 durch.

Es genügt zunächst, den Versuch nur mit der mittleren Spule (600 Windungen) 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 Schiebe-

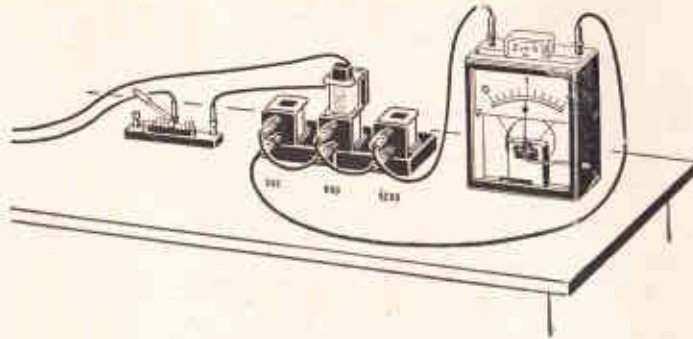


Abb. 7.6 – Induktion der Ruhe

widerstand. 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 irgendeinem 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.

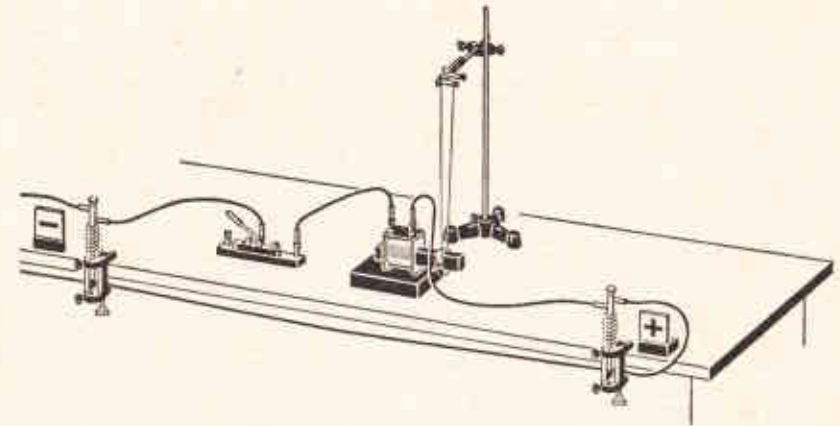
7.2.2.1. Die Richtung der Induktionsspannung bzw. des Induktionsstroms der Ruhe

Um die Richtung des durch Induktion der Ruhe erzeugten Induktionsstroms zu bestimmen, führen wir einen Versuch nach Abb. 7.7 durch:

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 Spulenstroms 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. Entgegengesetzte Magnetfelder stoßen sich ab. Nach der Rechte-Hand-Regel können wir die Stromrichtung bestimmen (vgl. hierzu Abb. 7.8). Mit dem Abschalten des Spulenstroms wird der magnetische Fluß im Eisenkern sowie im Al-Ring verringert. Der im Al-Ring erzeugte Induktionsstrom



= 6-8 V

Abb. 7.7 – Induktion der Ruhe (Richtung des Induktionsstroms)

wirkt der Verringerung entgegen, indem er ein Magnetfeld gleicher Richtung wie das ursprüngliche Magnetfeld der Spule aufbaut (Abb. 7.8, rechts).

Wir fassen zusammen:

Bei der **Verstärkung** des Magnetfelds (Zunahme des magnetischen Flusses beim Einschalten des Spulenstroms) ist das Magnetfeld des Induktionsstroms **entgegengesetzt**, bei einer **Schwächung** des Magnetfelds (Abnahme des magnetischen Flusses beim Abschalten des Spulenstroms) ist das Magnetfeld des Induktionsstroms mit dem Spulenfeld **gleichgerichtet**.

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

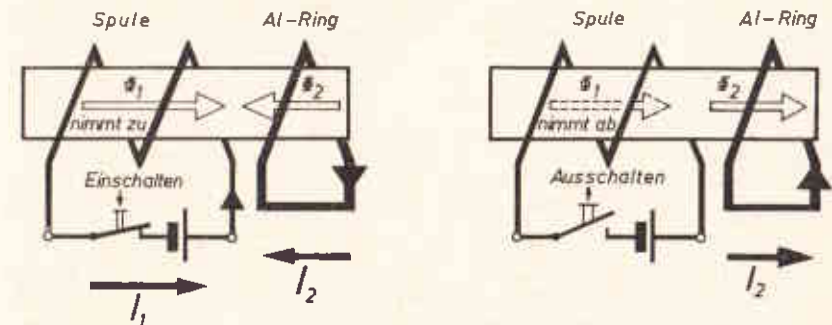


Abb. 7.8 – Die Richtung des Induktionsstroms der Ruhe

7.2.2.2. Die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe

Wir wollen jetzt den Versuch nach Abb. 7.6 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. Anstelle 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 Widerstands 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 Wechselstroms.

Für die Induktionsspannung der Ruhe ergibt sich folgender formelmäßiger Zusammenhang:

Größengleichung

$$U = B \cdot A \cdot N \cdot f \cdot 4,44 \quad \text{V}$$

Einheitengleichung

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

In dieser Formel bedeuten:

U = erzeugte Induktionsspannung in Volt (Effektivwert),

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

A = Eisenquerschnitt des Kerns in m^2 ,

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

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 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ gerechnet werden und der Effektivwert der Wechselspannung ergibt sich aus $\frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$.

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 abgeleitete Formel dient vorwiegend zur Berechnung der Windungszahlen für Transformatoren.

Beispiel:

Wieviel 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 1,1 Tesla.

Gegeben: $U = 24 \text{ V}$; $B = 1,1 \text{ T}$; $A = 4 \text{ cm}^2 = 0,0004 \text{ m}^2$; $f = 50 \text{ Hz}$

Gesucht: N

Lösung: $U = B \cdot A \cdot N \cdot f \cdot 4,44$

$$N = \frac{U}{B \cdot A \cdot f \cdot 4,44} = \frac{24 \text{ V}}{1,1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 0,0004 \text{ m}^2 \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} \cdot 4,44}$$

$$N = \underline{\underline{246}}$$

Die Wicklung muß 246 Windungen erhalten.

¹⁾ Vgl. hierzu Abschn. 8.2.

²⁾ Vgl. hierzu Abschn. 8.1.

7.2.3. Wirbelströme

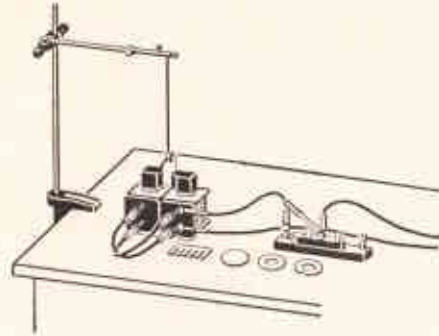


Abb. 7.9 – Die Wirkung von Wirbelströmen

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 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 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 aufgrund des größeren Widerstands des Stromwegs kein starker Wirbelstrom bilden. Die in dieser Weise verkleinerten Wirbelströme verursachen auch nur eine kleinere Hemmung gegenüber dem ersten Versuch.

7.2.3.1. Wirbelstrombremsung

Bei dem Versuch nach Abb. 7.10 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 Feldstroms.

Wir wollen einen Versuch nach Abb. 7.9 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?

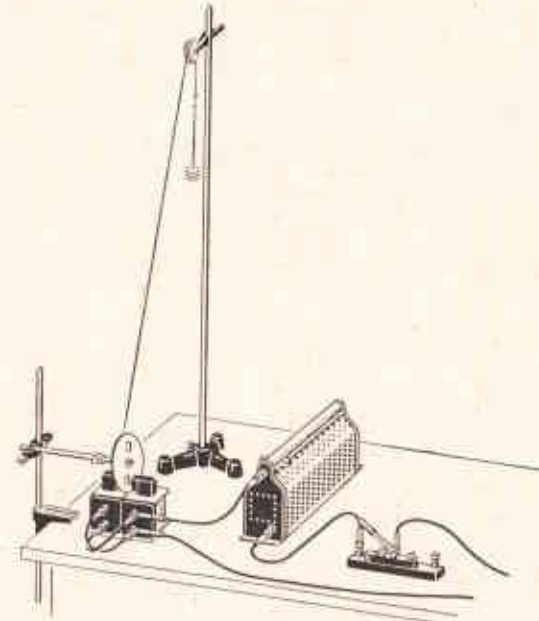


Abb. 7.10 – Wirbelstrombremse

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

7.2.3.2. Die Verringerung der Wirbelströme

Wir haben bei dem Versuch nach Abb. 7.9 gesehen, daß die Wirbelströme in der geschlitzten Scheibe nur gering waren. Sollen also die Wirbelströme verringert werden, muß man die Metallmasse möglichst fein unterteilen. Der Versuch nach Abb. 7.11 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.

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 geblättrtes aus. Dieses geblättrte 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

¹⁾ Vgl. hierzu Abschn. 10.1.

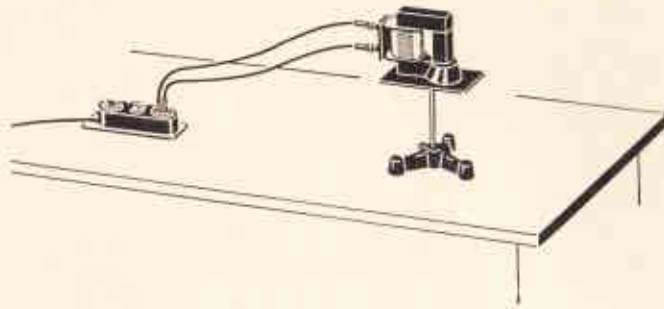


Abb. 7.11 – Wirbelstromverluste

Eisenkern einen so hohen Wirbelstrom verursacht, daß er 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 feingeläuterten (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 isolierte 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 geläuterten Kernen, weil die magnetischen Kraftlinien die mit Isoliermasse ausgefüllten Zwischenräume zwischen den einzelnen Eisenkörnchen überbrücken müssen, der Isolierstoff aber nur geringe magnetische Leitfähigkeit besitzt.

7.3. Selbstinduktion

Bei dem Versuch nach Abb. 7.12 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?

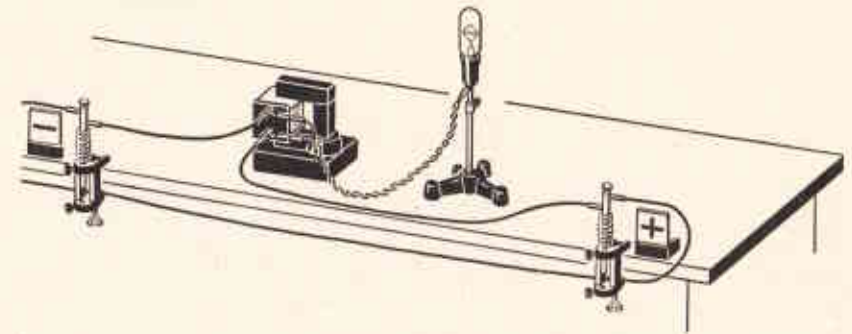


Abb. 7.12 – Selbstinduktionsspannung

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**. Die Entstehung der Selbstinduktionsspannung ist auf die Induktion der Ruhe zurückzuführen und beruht auf den gleichen Gesetzmäßigkeiten.

7.3.1. Richtung des Selbstinduktionsstroms

Bei dem Versuch nach Abb. 7.13 bleibt der Eisenkern der Spule zunächst noch ohne Joch. Den Strom regeln wir mit Hilfe des Schiebewiderstands so ein, daß das Milliampereometer einen Wert von 50 mA anzeigt. Nun legen wir das Joch auf und entfernen es wieder. Diesen Vorgang wiederholen wir einige Male und beobachten dabei das Meßinstrument:

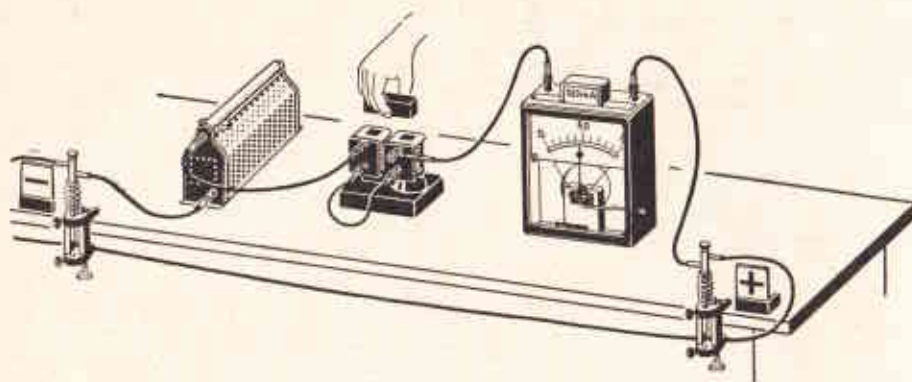


Abb. 7.13 – Die Richtung des Selbstinduktionsstroms

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 Selbstinduktionsstroms 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 Stroms führen.

In einer Spule wird bei Stromerhöhung (Einschalten) ein stromhemmender, bei Stromverminderung (Ausschalten) ein stromerhaltender Selbstinduktionsstrom erzeugt.

Wird ein Spulenstromkreis durch einen Schalter unterbrochen, so versucht die Spule, durch eine äußerst hohe Selbstinduktionsspannung einen Funkenüberschlag und somit einen Stromfluß zu ermöglichen.

7.3.2. Höhe der Selbstinduktionsspannung

Wir haben in dem Versuch nach Abb. 7.12 das Vorhandensein einer Induktionsspannung festgestellt. Nach den im vorhergehenden Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen ist nun auch zu verstehen, daß im ersten Ver-

such beim Schließen des Stromkreises die Glühlampe 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.

7.3.3. 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 anstelle der magnetischen Induktion den Strom berücksichtigen, weil bei festgelegter Windungszahl und Spulenlänge die Stärke des Magnetfeldes 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 Eigenschaft einer Spule in bezug auf die Selbstinduktion wird als **Induktivität** bezeichnet. Man setzt dafür das Formelzeichen L . Die Maßeinheit der Induktivität ist das Henry (H).

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Induktivität	L	H (Henry)

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

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

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

Für Spulen mit Lufthohlraum läßt sich die Induktivität nach folgender Formel annähernd genau bestimmen:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \quad \text{H}$$

¹⁾ Henry, amerikanischer Physiker, 1797-1878.

In dieser Formel bedeuten:

L = Induktivität in H,

N = Windungszahl, Einheit 1,

A = mittlerer Windungsquerschnitt in m^2 ,

l = Länge der Spule in m,

μ_0 = magnetische Feldkonstante $= 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ und

μ_r = Permeabilitätszahl, Einheit 1.

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 aufgrund 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.

Andererseits wird die Induktivität einer Spule mit Eisenkern aber auch durch den Sättigungsgrad des Kerna stark beeinflusst. Je stärker die Sättigung (bzw. Vormagnetisierung), desto geringer ist die magnetische Leitfähigkeit und desto kleiner die wirksame Induktivität.

Beispiel:

Eine Spule mit Lufthohlraum ist $l = 6 \text{ cm}$ lang, ihre Windungszahl ist $N = 1000$ und der Querschnitt des Spulenraums beträgt $A = 4 \text{ cm}^2$. Wie groß ist die Induktivität der Spule?

Gegeben: $N = 1000$; $l = 6 \text{ cm}$; $A = 4 \text{ cm}^2$; $\mu_r = 1$

Gesucht: L

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } L &= \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l} \\ L &= \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am} \cdot 1 \cdot 1000^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{6 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \\ L &= \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{6 \cdot 10^{-2}} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \\ L &= \frac{1,257 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{6} = 0,84 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \\ L &= 8,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \underline{\underline{8,4 \text{ mH}}} \end{aligned}$$

Die Induktivität der Spule beträgt $L = 8,4 \text{ mH}$.

7.3.3.1. 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 läßt sich dabei auf. Aufgabe des Wirkwiderstands ist es, den Entladungsstrom des Kondensators beim Schließen des Kontakts zu begrenzen.

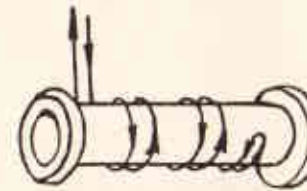


Abb. 7.14 – Bifilarwicklung

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 Abb. 7.14 zeigt. In der bifilaren (zweidrähtigen) Wicklung, in der die Stromrichtungen entgegengesetzt sind (siehe Pfeile in Abb. 7.14), heben sich die magnetischen Felder gegenseitig auf. Es kann keine Induktionsspannung entstehen.

7.3.4. Ein- und Ausschaltvorgänge in Spulenstromkreisen

Beim Ein- oder Ausschalten eines Stromkreises treten besonders krasse Stromänderungen auf. Sie wirken sich in einem Spulenstromkreis auf die Entstehung von Selbstinduktionsspannungen aus. Wir wollen zunächst untersuchen, was beim Einschalten eines Spulenstromkreises vorgeht.

Dazu führen wir einen Versuch nach Abb. 7.15 durch. Mit einem Schalter kann dabei die Parallelschaltung zweier Lampenstromkreise (gleiche Lampen!) ein- oder ausgeschaltet werden. In Reihe zur Lampe 2 liegt eine Spule mit geschlossenem Eisenkern (ca. 1000 Windungen). Damit beide Lampen im Betriebszustand gleich hell leuchten, wird vor die Lampe 1 ein Regelwiderstand geschaltet. Zunächst wird im eingeschalteten Zustand die Helligkeit der Lampe 1 auf gleiche Helligkeit wie Lampe 2 eingestellt und der Stromkreis wieder geöffnet.

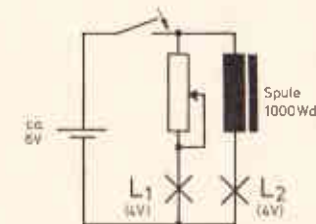


Abb. 7.15 – Einschaltvorgang an einer Spule (Versuchsschaltung)

Beobachtet man beim erneuten Einschalten die Schnelligkeit, mit der die beiden Lampen aufleuchten, so ist deutlich festzustellen:

Die in Reihe mit der Spule geschaltete Lampe 2 leuchtet verzögert auf.

Diese Erscheinung ist auf die Selbstinduktion zurückzuführen.

Beim **Ausschalten eines Spulenstromkreises** müßte die Stromstärke theoretisch in unendlich kurzer Zeit auf Null sinken. Eine sehr schnelle Stromänderung hat jedoch eine entsprechend hohe Selbstinduktionsspannung zur Folge. Nach dem Lenzschen Gesetz hat die Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten die gleiche Richtung wie die angelegte Spannung. Da der Stromkreis durch den Schalter geöffnet ist, wird die entstehende Selbstinduktionsspannung so groß, daß die Strecke zwischen den geöffneten Schalterkontakten durchschlagen wird. Den Beweis haben wir bereits anhand des Versuchs nach Abb. 7.12 geführt.

Zur Vermeidung der in vielen Fällen gefährlich hohen Selbstinduktionsspannung schaltet man entweder einen Funkenlöschkreis parallel zu den Schalterkontakten oder einen Widerstand R_S parallel zur Spule. Die letzte Maßnahme wird in der Relais-Schaltungstechnik auch dazu benutzt, die Abfallzeit eines Relais zu verzögern. Beim Ausschalten einer Spule mit Parallelwiderstand folgt die Stromstärke einer fallenden e-Funktion.

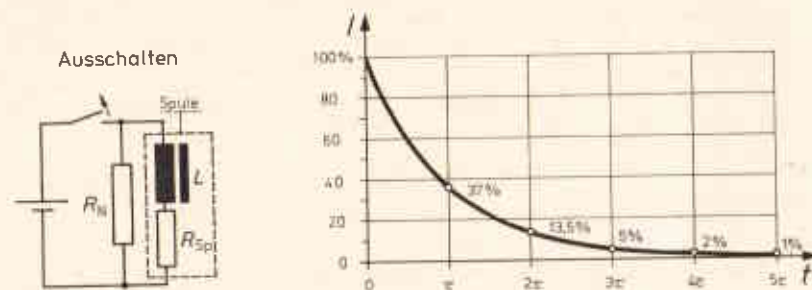


Abb. 7.17 – Ausschalten einer Spule mit Parallelwiderstand

Deshalb kann auch für den Ausschaltvorgang die Zeitkonstante als Richtwert herangezogen werden. Es gilt:

Beim Ausschalten eines induktiv belasteten Stromkreises ist die Stromstärke

nach der Zeit τ auf 37% und
nach der Zeit 5τ auf 1%

des ursprünglichen Werts gesunken.

Zur Berechnung der Zeitkonstante muß wieder der gesamte Widerstand berücksichtigt werden. Mit Parallelwiderstand wäre das $R_{Spule} + R_N$, ohne Parallelwiderstand im wesentlichen der Widerstand der Luftstrecke zwischen den Schalterkontakten.

Die Untersuchung der Ein- und Ausschaltvorgänge führt zu folgendem Ergebnis:

Beim Einschalten eines induktiv belasteten Stromkreises wird durch die Induktivität eine stromhemmende, beim Ausschalten eine stromerhaltende Selbstinduktionsspannung erzeugt.

7.3.5. Schaltung von Induktivitäten

7.3.5.1. Reihenschaltung

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.

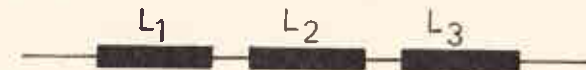


Abb. 7.18 – Reihenschaltung von Induktivitäten

Die Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Teilinduktivitäten.

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

Beispiel:

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

Gegeben: $L_1 = 0,8 H$; $L_2 = 1,5 H$; $L_3 = 2,5 H$

Gesucht: L

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

7.3.5.2. Parallelschaltung

Bei der **Parallelschaltung** von Induktivitäten fließt über jede Teilinduktivität nur ein Teil des Gesamtstroms (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.

Daraus folgt:

Die Gesamtinduktivität ist stets kleiner als die kleinste Teilinduktivität.

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

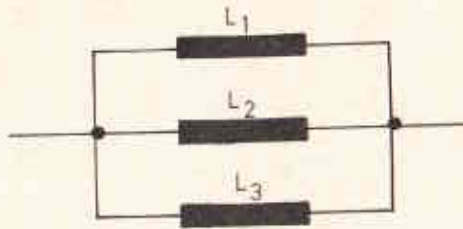


Abb. 7.19 – Parallelschaltung von Induktivitäten

Beispiel:

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

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

Gesucht: L

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

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

7.4. Bewegung durch Induktion

7.4.1. Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 7.20 wird ein Leiter an zwei Metallbändern aufgehängt, die gleichzeitig als Stromzuführung dienen. Mit Hilfe des Schiebewiderstands wird ein mittelstarker Strom eingestellt, so daß die Metallbänder nicht überlastet werden. Der Stromleiter wird in das Magnetfeld eines Hufeisenmagneten gehängt.

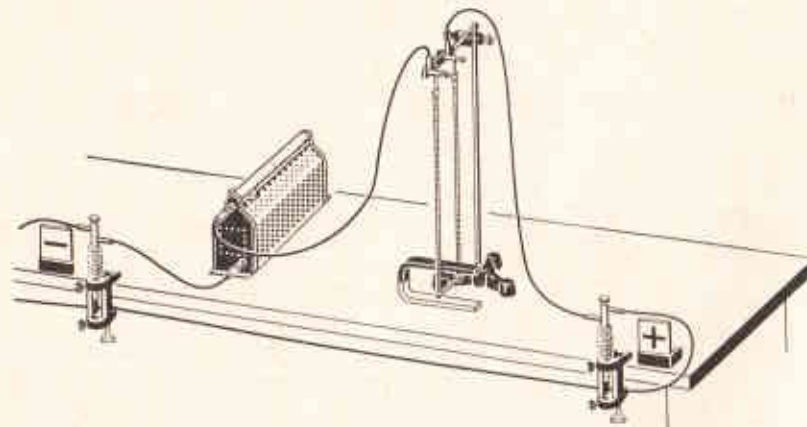


Abb. 7.20 – Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

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.

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. 7.21 erläutert werden. Im ersten Fall (Abb. 7.21a) 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. 7.21b 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 sich die Feldlinien um den Leiter mit den Feldlinien des Dauermagnetfelds, 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. 7.21a vom Beschauer fort, durch das Umkehren der Feldlinienrichtung wird jedoch das Feld rechts geschwächt und links verstärkt. Der Leiter wird also wie im zweiten Fall nach rechts bewegt.

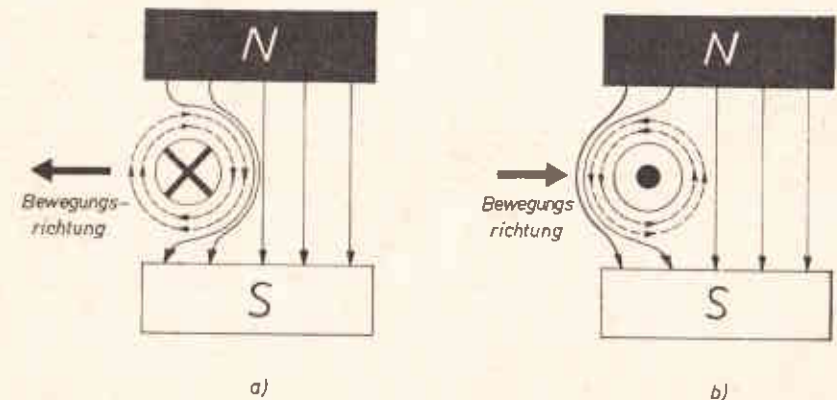


Abb. 7.21 – Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

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 Stroms weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

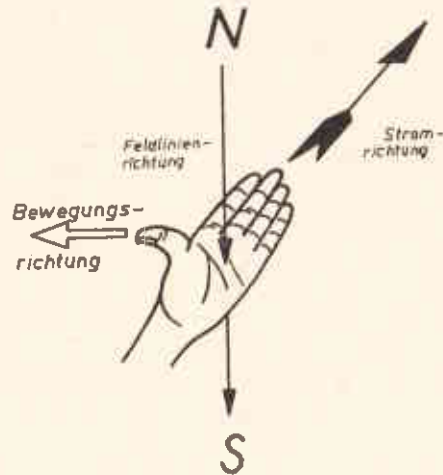


Abb. 7.22 - Linke-Hand-Regel

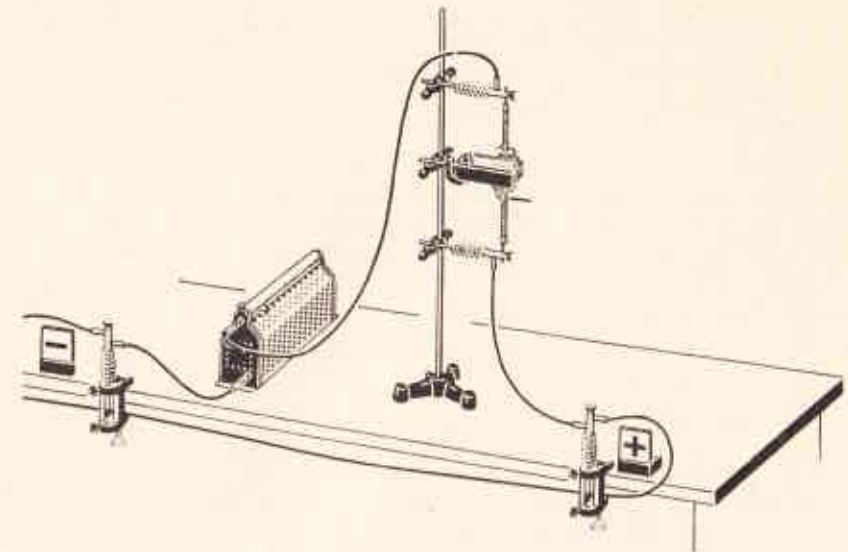
Da die Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld bei Motoren ausgenutzt wird, bezeichnet man die Linke-Hand-Regel auch als **Motor-Regel**.

7.4.2. Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

Bei dem Versuch nach Abb. 7.23 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. Die Spule dreht sich innerhalb des Magneten rechtsherum. Wird die Stromrichtung umgekehrt, dreht sich die Spule linksherum. Lassen wir diese Stromrichtung bestehen und drehen statt dessen den Magneten, so dreht sich die Spule wieder rechtsherum.

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 Magnetfelds abhängig.



= 3 - 4 V

Abb. 7.23 - Die stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

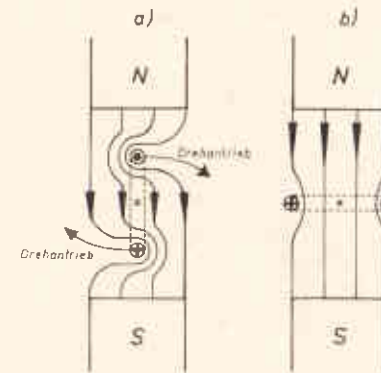


Abb. 7.24 - Drehrichtung der Spule

Mit Hilfe der Abb. 7.24 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 Versuchs senkrecht zueinander (Abb. 7.24a); sie haben das Bestreben, sich in die gleiche Richtung einzustellen (Magnetnadel im Erdkraftfeld). Die Spule (hier die Leiterschleife) wird sich deshalb rechtsherum drehen (Abb. 7.24b). 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 Stillstands der Spule die Stromrichtung ändern. Den Bereich des Stillstands nennt man die neutrale Zone, und statt vom Ändern der Stromrichtung spricht man

vom Wenden des Stroms. 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.

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

$$F = B \cdot l \cdot I \quad \text{N}$$

In dieser Formel bedeuten:

F = die Kraft in N (Newton), mit der ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld abgelenkt wird,

B = magnetische Induktion in Tesla des äußeren Magnetfelds,

l = wirksame Länge des Leiters in m,

I = Stromstärke im Leiter in A.

Beispiel:

Bei einem Motor beträgt die magnetische Flußdichte zwischen den Magnetpolen $B = 1,0 \text{ T}$. Die für die Kraftwirkung wirksame Leiterlänge ist $l = 2,5 \text{ m}$. Die Ankerwicklung wird von einem Strom von $I = 4,4 \text{ A}$ durchflossen. Welche Kraftwirkung wird auf den Anker ausgeübt?

Gegeben: $B = 1,0 \text{ T}$; $l = 2,5 \text{ m}$; $I = 4,4 \text{ A}$

Gesucht: F

Lösung: $F = B \cdot I \cdot l$

$$F = \frac{1,0 \text{ Vs} \cdot 4,4 \text{ A} \cdot 2,5 \text{ m}}{\text{m}^2} = 11 \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{m}} = 11 \frac{\text{Ws}}{\text{m}}$$

$$F = \underline{11,0 \text{ N}} \quad (1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}; 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{m}})$$

Die auf den Anker wirkende Kraft beträgt $F = 11,0 \text{ N}$ (entsprechend $F = 11,0 \cdot 0,102 = 1,12 \text{ kp}$).

Zusammenstellung der magnetischen Größengleichungen

Begriff	Formelzeichen	Benennung	Einheit	Kurzzeichen	Größengleichung
Kraftwirkung auf magnetische Werkstoffe	F	Newton		N	$F = 40 \cdot 10^4 \cdot B^2 \cdot A$
Kraftwirkung auf stromdurchflossenen Leiter	F	Newton		N	$F = B \cdot l \cdot I$
Bewegungsspannung	U	Volt		V	$U = B \cdot l \cdot v$
Transformationsspannung	U	Volt		V	$U = 4,44 \cdot \Phi \cdot N \cdot f$
Induktivität	L	Henry		H	$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l}$
Zeitkonstante	τ	Sekunde		s	$\tau = \frac{L}{R}$
Einschaltdauer	t	Sekunde		s	$t = 5 \cdot \tau$
Reihenschaltung von Induktivitäten	L	Henry		H	$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$
Parallelschaltung von Induktivitäten	L	Henry		H	$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$

Sämtliche Größen werden eingesetzt:

B in T I in A f in Hz A in m^2

v in m/s

L in H l in m

Φ in Wb

R in Ω

8. Grundlagen der Wechselstromlehre

8.1. Entstehung des Wechselstroms

8.1.1. Die bewegte Spule im Magnetfeld

Im Abschn. 7.2.1 haben wir festgestellt, daß in einem Leiter, der im Magnetfeld bewegt wird, eine Induktionsspannung erzeugt wird.

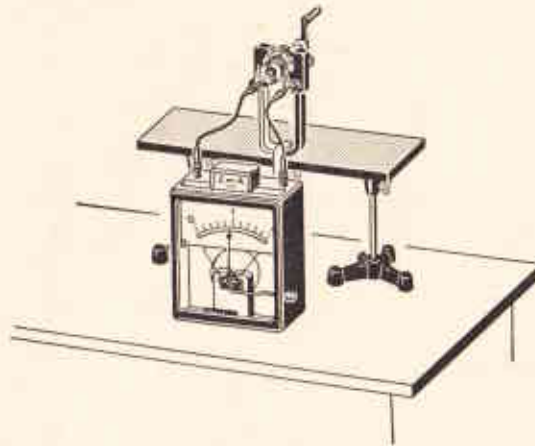


Abb. 8.1 – Erzeugung einer Wechselspannung

Das angeschlossene Milliamperemeter 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 Milliamperemeter 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.

8.1.2. Der zeitliche Verlauf der Wechselspannung

Es soll jetzt untersucht werden, wie sich die in der gedrehten Spule (Leiterschleife) erzeugte Wechselspannung im zeitlichen Verlauf ändert.

Die **Größe** (Betrag) der erzeugten Induktionsspannung hängt davon ab, in welchem Umfang sich der magnetische Fluß Φ innerhalb einer Spule in einer bestimmten Zeit ändert.

Der Versuch nach Abb. 8.1 soll uns zeigen, welche Wirkung ein zu einer Spule aufgewickelter Leiter zeigt, wenn die Spule in einem Magnetfeld gedreht wird.

Im Magnetfeld eines Dauermagneten (man kann natürlich auch einen Elektromagneten verwenden) wird eine Spule, die auf einem 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

Bei der Betrachtung der Abbildungen 8.2 und 8.3 müssen wir voraussetzen, daß das Magnetfeld homogen ist und die Leiterschleife gleichmäßig gedreht wird. Die Leiterschleife wird daher in gleichen Zeitabschnitten um den jeweils gleichen Winkel (z. B. 30°) weiterbewegt. Somit gilt auch, daß sich Winkel und Zeit entsprechen.

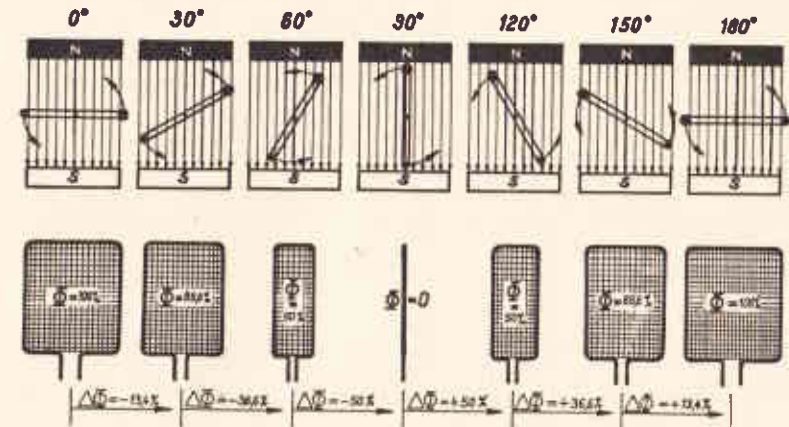


Abb. 8.2 – Änderung des magnetischen Flusses in der Leiterschleife

In der Abb. 8.2 ist die Leiterschleife in verschiedenen Bewegungsphasen von 0° bis 180° dargestellt. Die Draufsicht läßt den Umfang des jeweils in der Leiterschleife vorhandenen magnetischen Flusses erkennen. Bei einer Drehung von 0° bis 30° nimmt der magnetische Fluß in der Leiterschleife ab und beträgt in der 30° -Stellung noch 86,6% des Flusses bei 0° . Die Änderung des magnetischen Flusses beträgt also $\Delta\Phi = -13,4\%$. In der 60° -Stellung durchsetzen nur noch 50% der Feldlinien die Leiterschleife; zwischen 30° und 60° nimmt also der Fluß bereits um $\Delta\Phi = 36,6\%$ ab. Die stärkste Flußänderung tritt zwischen 60° und 90° auf; sie beträgt hier $\Delta\Phi = -50\%$. Zwischen 90° und 180° nimmt dann der magnetische Fluß wieder zu, und zwar zunächst stark.

Es genügt, die Drehung der Leiterschleife von 0° bis 180° zu betrachten, um beurteilen zu können, wie die Verhältnisse zwischen 180° und 360° liegen.

Aus den bisherigen Betrachtungen kann gefolgert werden: Wird eine Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld gleichmäßig gedreht, so entsteht in ihr eine Induktionsspannung, die in jedem Augenblick einen anderen Betrag hat.

In der Nähe von 0° ist die Spannung am geringsten (geringe bzw. keine Flußänderung in der Zeit); dagegen ist sie bei 90° am höchsten (große Flußänderung in der Zeit).

Man spricht von den Augenblickswerten der Spannung und setzt dafür das Formelzeichen u , und von den Augenblickswerten des Stroms, Formelzeichen i .

Bei weiterer Drehung würde die Spannung bei 180° Null, zwischen 180° und 270° wieder zunehmen und schließlich bis 360° wieder auf Null absinken. Die Leiterschleife befindet sich nun wieder in der Ausgangslage.

Jetzt muß noch die **Richtung** der Spannung bestimmt werden. Die Richtung der Induktionsspannung hängt davon ab, ob

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

Für die im Magnetfeld gedrehte Leiterschleife ergibt sich dabei:

Zwischen 0° und 90° nimmt der magnetische Fluß ab. Somit muß die Spannung eine gleichbleibende Richtung haben. Von 90° bis 180° wird der magnetische Fluß größer. In der Stellung 90° ändert sich jedoch gleichzeitig die Richtung, in der der magnetische Fluß die Leiterschleife durchsetzt. Beide Vorgänge heben sich in ihrer Wirkung gegeneinander auf, so daß die Richtung der Induktionsspannung zwischen 0° und 180° gleichbleibt (positive Halbwelle).

In der Lage 180° findet ein Übergang von Zu- auf Abnahme des magnetischen Flusses ohne Richtungswechsel statt. Damit muß sich bei 180° die Richtung der Induktionsspannung umkehren (negative Halbwelle von 180° bis 360°).

Wir erkennen:

Die in einer gedrehten Leiterschleife erzeugte Induktionsspannung ändert nach jeweils 180° ihre Richtung.

Eine Spannung, die periodisch ihre Richtung wechselt, bezeichnet man als Wechselspannung. Da die Spannung in einem geschlossenen Stromkreis einen Strom zur Folge hat, gilt auch:

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

Für den Fall, daß eine Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld gleichmäßig gedreht wird, ergibt sich eine **sinusförmige Wechselspannung**. Wir können ihren Verlauf anhand der Abb. 8.3 ableiten.

Der Anfang A einer Leiterschleife beschreibt bei einer Umdrehung von 360° einen Kreisumfang. Wir denken uns den Kreisumfang als Strecke abgewickelt und

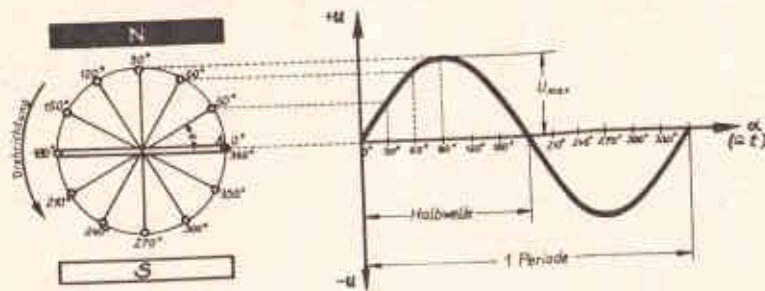


Abb. 8.3 – Verlauf der sinusförmigen Wechselspannung

tragen im rechten Diagramm die Winkel von 0° bis 360° in 30° -Abständen als Strecke auf der waagerechten Achse ab. Senkrecht dazu wird der Betrag der Augenblickswerte der Induktionsspannung zu den einzelnen Bewegungsphasen abgetragen. Dabei ist die Länge des Lots, das wir bei einer bestimmten Stellung der Leiterschleife vom Leiteranfang A auf die Waagerechte fällen, ein Maß für die Höhe der erzeugten Induktionsspannung. Verbinden wir im rechten Diagramm die so ermittelten Punkte untereinander, so erhalten wir eine Sinuskurve. **Da gleiche Winkel gleichen Zeitabschnitten entsprechen, stellt das Diagramm den zeitlichen Verlauf der erzeugten Wechselspannung dar.**

8.1.3. Die Periode und die Frequenz

Aus dem Spannungsverlauf nach Abb. 8.3 ist zu erkennen, daß bei einer Umdrehung der Spule eine positive und eine negative Spannungs-Halbwelle entsteht. **Die beiden Halbwellen ergeben zusammen eine Periode.** Die Anzahl der Perioden in der Sekunde bezeichnet man als **Frequenz f** , sie wird in Hertz¹⁾ Hz gemessen:

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

Die Größenordnung 1 Hertz ist sehr klein und wird zur Frequenzangabe bei technischem Wechselstrom angewandt. So beträgt beispielsweise die Frequenz

- des Netzwechselstroms in Deutschland 50 Hz,
- des Netzwechselstroms in den USA 60 Hz,
- des Fahrstroms bei der Bundesbahn $16\frac{2}{3}$ Hz.

In der Fernmeldetechnik wird mit erheblich höheren Frequenzen gearbeitet. Man rechnet daher mit anderen Größenordnungen wie kHz, MHz oder gar GHz. Dazu einige Beispiele:

- Frequenzband beim Fernsprechen 0,3 kHz ... 3,4 kHz,
- Rundfunksender (Mittelwelle) z. B. 800 kHz,
- Fernsehsender (UHF) z. B. 600 MHz.

8.1.3.1. Die Frequenz abhängig von der Anzahl der Polpaare

Soll in der Versuchsanordnung nach Abb. 8.1 ein Wechselstrom von 50 Hz erzeugt werden, so ist die Spule 50mal in der Sekunde zu drehen, das sind in der Minute $50 \cdot 60 = 3000$ mal. Der Magnet hat 2 Pole, das ist ein Polpaar.

Hätte die Anordnung 2 Polpaare (4 Pole), so würden bei einer Umdrehung der Spule 2 Perioden entstehen. Soll jetzt wiederum ein Wechselstrom von 50 Hz erzeugt werden, muß die Spule nur $50 : 2 = 25$ mal in der Sekunde und in einer Minute nur $50 \cdot 60 : 2 = 1500$ mal gedreht werden.

Wir können also folgern:

Je höher die Polpaarzahl des Generators ist, desto kleiner ist die zur Erzielung einer bestimmten Frequenz erforderliche Drehzahl. Da die Fre-

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

quenz in der Einheit 1/s, die Umdrehungszahl einer Maschine aber in der Einheit 1/min angegeben wird, muß mit dem Faktor 60s/min multipliziert werden. Man erhält so die Formel:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad \frac{1}{\text{min}}$$

In dieser Formel bedeuten:

n = Umdrehungszahl in 1/min,
 f = Frequenz in Hz und
 p = Polpaarzahl, Einheit 1.

Aus dieser Formel läßt sich durch Umstellung die Frequenz f zu

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

und die Zahl der Polpaare zu

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

errechnen.

8.1.4. Maximal- und Effektivwerte

In der Wechselspannung nach Abb. 8.3 ergeben sich zwei Höchstwerte, ein positiver und ein negativer. Diese Werte nennt man auch **Maximalwerte**¹⁾.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Maximalwert der Spannung	$\hat{u}$ oder $U_{\max}$	V
Maximalwert des Stroms	$\hat{i}$ oder $I_{\max}$	A

Schalten wir an eine Wechselspannungsquelle einen Widerstand R als Verbraucher, so ändern sowohl die Spannung als auch der Strom im zeitlichen Verlauf ständig ihre Größe und Richtung. Somit nimmt der Verbraucher auch in jedem Augenblick eine andere Leistung auf. Das soll einmal anhand eines Zahlenbeispiels und eines Diagramms (Abb. 8.4) untersucht werden.

Der Augenblickswert der aufgenommenen Leistung läßt sich für jeden beliebigen Zeitpunkt aus den für diesen Zeitpunkt geltenden Augenblickswerten für Spannung und Strom errechnen:

$$p = u \cdot i \quad \text{W}$$

Der Einfachheit halber wollen wir festlegen, daß die Wechselspannung auf den höchsten Augenblickswert von 100 V und der Wechselstrom auf den Höchstwert 10 A steigen kann; der Verbraucherwiderstand R soll 10 Ω betragen. Berechnen wir nach der obigen Formel nacheinander die Augenblickswerte der Leistung während einer Periode und tragen sie in ein Diagramm ein, so erhalten wir einen Kurvenverlauf entsprechend Abb. 8.4 unten.

¹⁾ maximum (lat.) = das Höchste

Das Leistungsdiagramm beweist, daß die Leistungsaufnahme des Verbrauchers tatsächlich in jedem Augenblick einen anderen Wert hat.

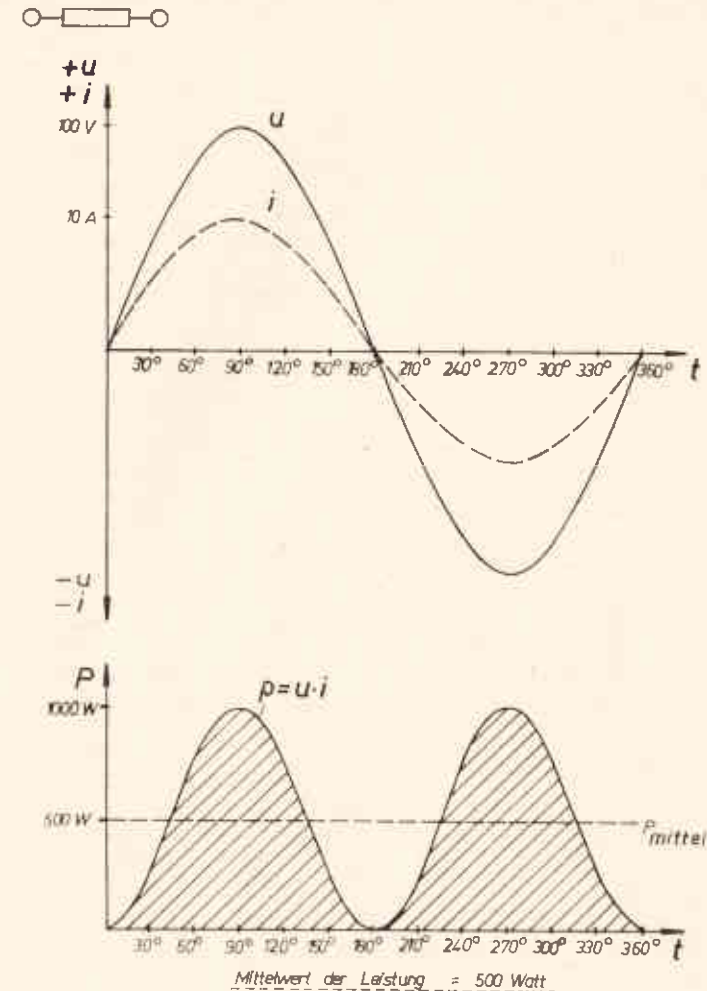


Abb. 8.4 – Diagramm zur Ableitung des Effektivwerts

Somit müßte z. B. eine Glühlampe an Wechselspannung während einer Periode zweimal hell aufleuchten und wieder dunkel werden. Daß wir das bei 50-Hz-Wechselstrom nicht beobachten können, hängt mit der Trägheit des menschlichen Auges und zum Teil auch mit der Wärmeträgheit des Glühlampen-Heizfadens zusammen. Dennoch wird gerade dieser Hell-Dunkel-Effekt einer Glühlampe mit dünnem Heizfaden zur Drehzahlmessung (z.B. bei Studioplattenspielern) ausgenutzt. Wir kommen darauf im Abschnitt 9.3. „Die Leistung im Wechselstromkreis“ noch zurück.

Für die Praxis ist die Angabe irgendeines Augenblickswerts meistens völlig uninteressant. Darum müssen wir für die zeitlich veränderlichen Größen des Wechselstroms Durchschnittswerte ermitteln. Man bezieht diese Durchschnittswerte im allgemeinen auf die Wirkung (z. B. Wärmewirkung) einer Wechselspannung oder eines Wechselstroms und spricht dabei von den Effektivwerten¹⁾. Wir suchen somit im Leistungsdiagramm nach Abb. 8.4 den Durchschnittswert und erhalten für unser gewähltes Zahlenbeispiel einen Leistungs-Durchschnittswert (Leistungs-Effektivwert) von

$$P_{\text{mittel}} = \frac{P_{\text{max}}}{2} = \frac{1000 \text{ W}}{2} = 500 \text{ W.}$$

Da sich P_{max} aus $U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}$ ergibt, können wir weiter ableiten:

$$P_{\text{mittel}} = \frac{U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}}{2}.$$

Für 2 kann auch das Produkt $\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}$ gesetzt werden:

$$P_{\text{mittel}} = \frac{U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{U_{\text{max}}}{1,414} \cdot \frac{I_{\text{max}}}{1,414}.$$

Der Quotient $\frac{1}{1,414}$ ergibt den Wert 0,707, so daß wir auch

$$P_{\text{mittel}} = 0,707 U_{\text{max}} \cdot 0,707 I_{\text{max}} \text{ schreiben können.}$$

Für $0,707 U_{\text{max}}$ setzt man nun in der Wechselstromlehre das Formelzeichen U_{eff} (oder auch einfach U) und spricht vom Effektivwert der Spannung. Genauso wird $0,707 I_{\text{max}}$ durch das Formelzeichen I_{eff} (oder einfach I) ersetzt.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Effektivwert der Spannung	U_{eff} (oder U)	V
Effektivwert des Stroms	I_{eff} (oder I)	A

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.

Bis auf wenige Ausnahmen beziehen sich alle Spannungs- und Stromangaben für sinusförmigen Wechselstrom auf die Effektivwerte. Sind Wechselungen ausgeschlossen, so fehlt bei den entsprechenden Angaben sogar der Hinweis „effektiv“. Man spricht daher auch nicht vom Effektivwert oder Mittelwert der Leistung, sondern einfach von der Wechsel-

¹⁾ Effekt = Wirkung

stromleistung P . Die Umrechnung der Maximal- in Effektivwerte und umgekehrt kann mit folgenden Formeln vorgenommen werden:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{1,414} = 0,707 \cdot U_{\text{max}} \quad \text{V}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{1,414} = 0,707 \cdot I_{\text{max}} \quad \text{A}$$

$$U_{\text{max}} = 1,414 \cdot U_{\text{eff}} \quad \text{V}$$

$$I_{\text{max}} = 1,414 \cdot I_{\text{eff}} \quad \text{A}$$

In diesen Formeln bedeuten:

U_{eff} = Effektivwert der Spannung in V,

I_{eff} = Effektivwert des Stroms in A,

U_{max} = Höchstwert der Spannung in V,

I_{max} = Höchstwert des Stroms in A und

$0,707 = \frac{1}{1,414}$ = Umrechnungsfaktoren, Einheit 1.

Diese Beziehungen gelten jedoch nur für sinusförmige Wechselspannung bzw. sinusförmigen Wechselstrom. Weicht die Kurvenform des Wechselstroms wesentlich von der Sinusform ab, so gibt man den Gesamtbetrag vom negativen bis zum positiven Höchstwert an und schreibt U_{ss} bzw. I_{ss} .

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: U_{max}

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

2. Beispiel:

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

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

Gesucht: I_{eff}

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

8.2. Wechselstromwiderstände

8.2.1. Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis

Wir wollen in einem Versuch nach dem Schema der Abb. 8.5 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 $R = 10 \text{ Ohm}$.

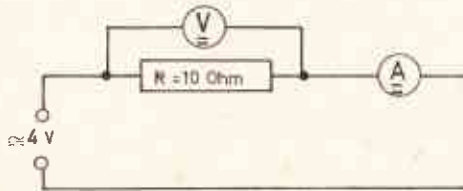


Abb. 8.5 – Der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis

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 Effektivwerte eingesetzt werden.

Beispiel:

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

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

Gesucht: I ; R

Lösung: $P = U \cdot I$

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

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

8.2.2. Die Spule im Wechselstromkreis

Das Schema des Versuchs nach Abb. 8.6 ist das gleiche wie in der Abb. 8.5. 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:

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

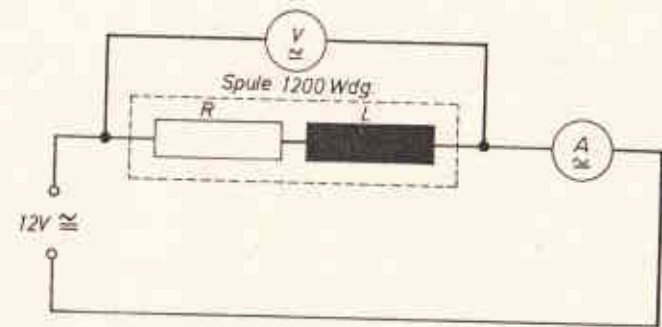


Abb. 8.6 – Die Spule im Wechselstromkreis

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 ist zu ersehen:

- 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.

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

Der Gleichstromwiderstand der Spule ist gleich dem ohmschen Widerstand des Spulendrahts. 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 Spulenwiderstands 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 Spulendrahts jedoch festliegt, muß in dem errechneten **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 Wechselstroms abhängig. Würde man beim Versuch nach Abb. 8.6 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 .

8.2.2.2. Kreisfrequenz

In Abb. 8.3 ist der Verlauf der sinusförmigen Wechselspannung aus der Kreisbewegung einer Leiterschleife abgeleitet 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 $U = d \cdot \pi = 2 \cdot \pi$. 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, $U = 2 \pi \cdot 2$; das entspricht einer Frequenz $f = 2$ Hz. Bei f Umdrehungen oder bei einer Frequenz von f Hz wird $U = 2 \pi \cdot f$. Diesen

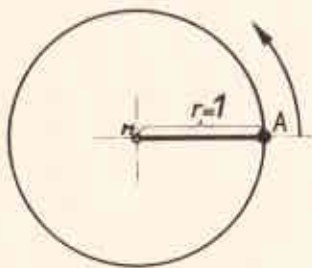


Abb. 8.7 – Einheitskreis

Ausdruck nennt man **Kreisfrequenz** und bezeichnet sie mit dem griechischen Buchstaben ω (omega). Die **Kreisfrequenz** ergibt sich also aus folgender Beziehung:

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

In dieser Formel bedeuten:

ω = Kreisfrequenz in $\frac{1}{s}$,

$2 \cdot \pi$ = Umrechnungsfaktoren, Einheit 1 und

f = Frequenz in Hz = $\frac{1}{s}$.

Beispiel:

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

Gegeben: $f = 50$ Hz

Gesucht: ω

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

8.2.2.3. Induktiver Widerstand und Frequenz

Wir haben bereits erkannt, daß der induktive Widerstand mit der Induktivität der Spule und mit der Frequenz steigt. Die in einer Induktivität bei Stromänderung bewirkte Selbstinduktionsspannung und somit auch der induktive Widerstand wächst mit der Änderungsschnelligkeit. Die Änderung erfolgt aber bei sinusförmigem Wechselstrom nicht linear. Da sinusförmiger Wechselstrom durch die Kreisbewegung einer Leiterschleife erzeugt wird, muß zur Bestimmung des induktiven Widerstands die Kreisfrequenz berücksichtigt werden. Zur Berechnung des induktiven Widerstands bedient man sich der Formel:

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

In dieser Formel bedeuten:

X_L = induktiver Blindwiderstand in $\Omega = \frac{V}{A}$,

$2 \cdot \pi \cdot f = \omega$ = Kreisfrequenz in $\frac{1}{s}$,

L = Induktivität in H.

Die Richtigkeit der Formel läßt sich leicht beweisen, wenn man die entsprechenden Maßeinheiten einsetzt:

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

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

1. Beispiel:

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

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

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

Gesucht: L

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

Gesucht: f

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

8.2.2.4. 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 geändert werden, indem man den Eisenschluß der Spule verändert. Bekanntlich ist die Größe des induktiven Widerstands 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 Widerstands, 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 Ausbleiben niedriger Frequenzen, in Siebschaltungen hinter Netzgleichrichtern und als Vergleichsinduktivität für Meßzwecke.

8.2.2.5. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

Es soll anhand der Abb. 8.8 untersucht werden, wie sich Strom und Spannung an einem rein ohmschen Widerstand verhalten.

An einen Polwender wird einmal eine Gleichspannung und zum anderen ein Festwiderstand angelegt, in dessen Stromkreis ein Amperemeter geschaltet ist. Ein Voltmeter liegt außerdem parallel zum Widerstand. Die Meßinstrumente werden so geeicht, daß ihre Zeiger in Mittelstellung stehen.

Durch die Verwendung des Polwenders kann ein Strom wechselnder Richtung erzeugt werden. Die Kurbel des Polwenders dreht man etwa 3- bis 4mal in der

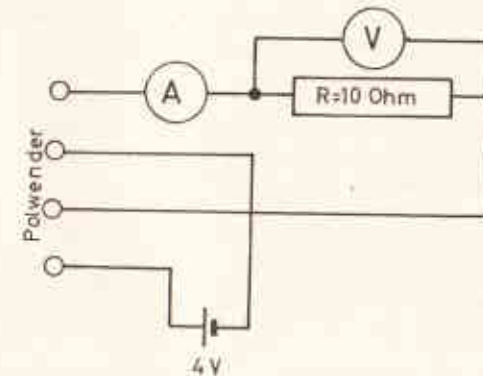


Abb. 8.8 – Phasenlage am ohmschen Widerstand (Versuchsschaltung)

Sekunde herum. Eine Umdrehung der Kurbel entspricht einem Winkel von 360° . Während einer Umdrehung ergibt sich also eine Spannungskurve, die dem Verlauf einer sinusförmigen Wechselspannung ähnelt.

Werden beide Meßinstrumente zu gleicher Zeit beobachtet, kann man feststellen, 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. Werden in einem Schaubild auf der Waagerechten die Umdrehung des Polwenders und auf der Senkrechten die Werte für Strom und Spannung aufgetragen, so erhält man eine Strom- und eine Spannungskurve nach Abb. 8.9.

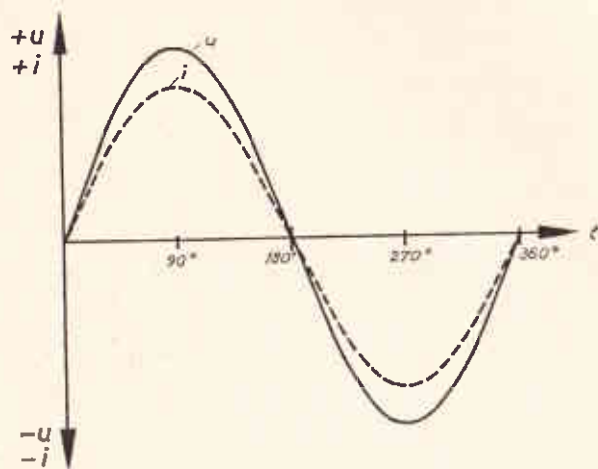


Abb. 8.9 – Liniendiagramm für Spannung und Strom am ohmschen Widerstand

Es ist, abgesehen von den Höchstwerten, der gleiche Verlauf beider Kurven zu erkennen; man sagt, sie haben die gleiche Phasenlage. Aus der Abb. 8.9 und aus dem vorher Gesagten kann abgeleitet werden:

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 Widerstands eine **Spule mit einem geschlossenen 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 Stroms erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird.

Aus diesem Vorgang kann abgeleitet werden:

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. 8.9 schon gehabt haben. Der Strom hat jedoch 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. 8.10 ist zu erkennen, daß der Strom und die Spannung nicht mehr die gleiche Phasenlage haben, sondern daß sich die Phasenlage um 90° verschoben hat.

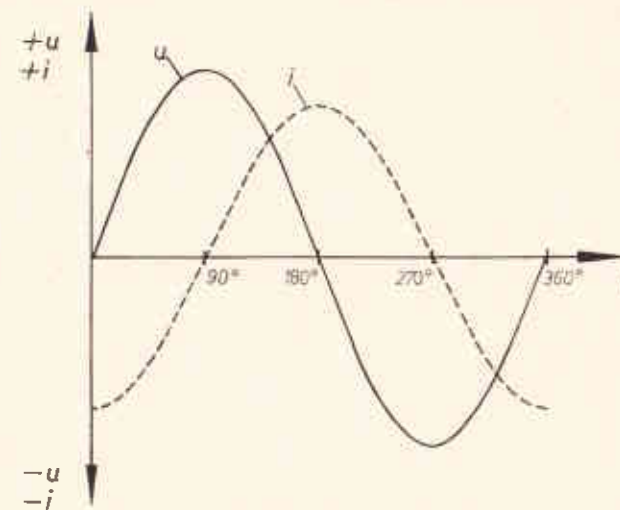


Abb. 8.10 – Phasenlage am induktiven Widerstand

Bei einem rein induktiven Widerstand in einem Wechselstromkreis tritt infolge der Nachheilung des Stroms gegen die Spannung eine Phasenverschiebung von 90° auf.

Jetzt wollen wir bei unserem Versuch das Joch des Eisenkorns entfernen und den Versuch wiederholen. Die Nachheilung 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 Widerstands 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.

8.2.2.6. Die Berechnung der Widerstandswerte einer Spule

8.2.2.6.1. 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. 10 V als Zeiger dargestellt werden, so entsprechen, wie in Abb. 8.11 gezeigt, bei einem Maßstab von 2 mm für 1 V, 20 mm gleich 10 V.

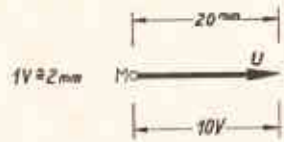


Abb. 8.11 – Spannungszeiger

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.

Grundsätzlich ist festgelegt, den Zeiger um den Mittelpunkt M linksherum kreisen zu lassen (vgl. hierzu auch Abb. 8.7). Dabei erhält man durch die Abwicklung des Weges, den die Pfeilspitze zurücklegt ($U = d \cdot \pi$), auf einer Geraden wiederum die Wechselspannungskurve nach Abb. 8.3.

Beim rein ohmschen Widerstand liegen der Strom und die Spannung in Phase, sie erreichen also zu gleicher Zeit den Nullpunkt und den Höchstwert. Im Zeigerdiagramm liegen deshalb beide Zeiger in der gleichen Richtung. Läßt man beide Zeiger linksherum drehen, so erhält man bei Abwicklung der Zeigerwege die in Phase liegenden Kurven nach Abb. 8.12.

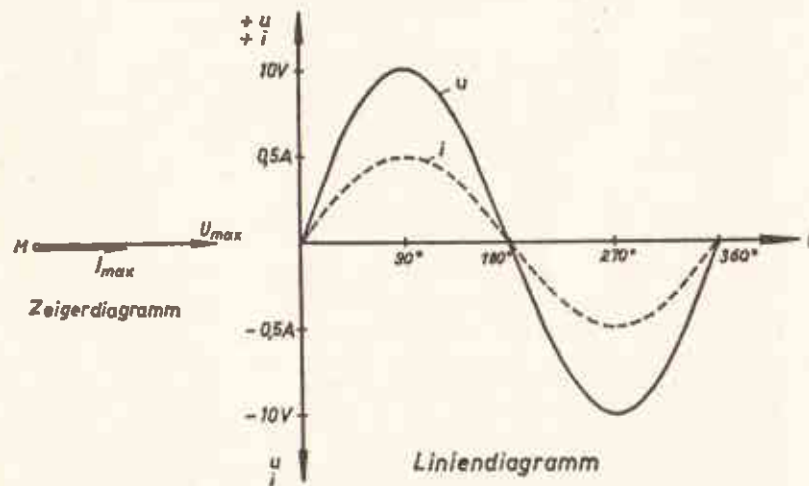


Abb. 8.12 – Spannung und Strom an einem Wirkwiderstand

Beim rein induktiven Widerstand (unter Vernachlässigung des zur Spule gehörenden Wirkwiderstands) 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 linksherum laufen, so muß sich ein Liniendiagramm nach Abb. 8.13 ergeben; wir haben zwischen der Strom- und der Spannungs-kurve eine Phasenverschiebung von 90° . Für unsere Zeichnung nach Abb. 8.13 wählen wir die gleichen Werte und den gleichen Maßstab wie für die vorherigen Diagramme.

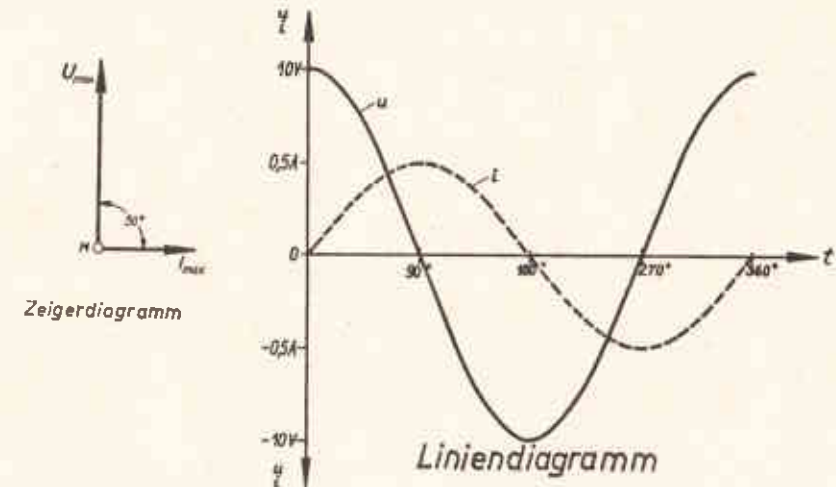


Abb. 8.13 – Spannung und Strom an einem induktiven Widerstand

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 = Blindwiderstand (90° vorausleitend) senkrecht vom Punkt M aus ab, so ergibt sich die Gesamtspannung als Diagonale eines aus Wirkspannung und Blindspannung konstruierten Parallelogramms (Abb. 8.14). Um das Ergänzen des Zeigerdiagramms zu einem Parallelogramm einzusparen, zeichnet man das Zeigerdiagramm im allgemeinen so, daß aus den einzelnen Größen direkt das Ergebnis ermittelt werden 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 ersten Strecke wird die nächste gesetzt usw. Man beginnt dabei immer mit der Wirkgröße (z. B. Wirkspannung). In der Abb. 8.14 wird dieses Verfahren veranschaulicht. Am Wirkwiderstand fällt die Spannung U_W und am induk-

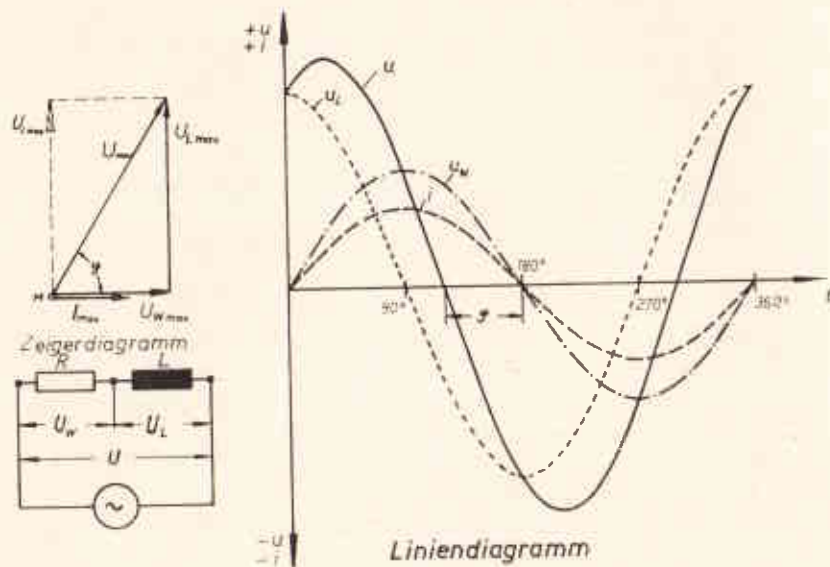


Abb. 8.14 – Spannung und Strom an einer Reihenschaltung
Wirkwiderstand – induktiver Widerstand

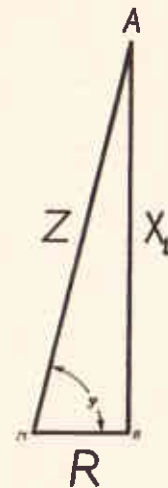
tiven Widerstand die Spannung U_L ab. U_W und der Strom I sind in Phase, dagegen ist U_L um 90° vorausseilend verschoben. Beide Widerstände zusammen bilden den Scheinwiderstand, an dem die Gesamtspannung (auch Scheinspannung genannt) U abfällt. Die Scheinspannung ergibt sich als Hypotenuse des rechtwinkligen 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 nehmen wir die Werte $I_{\max} = 0,5 \text{ A}$; $U_{\max} = 6 \text{ V}$ 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. 8.14. 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 und erhalten $\varphi = 60^\circ$.

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!).

Wir wollen nun ein Zeigerdiagramm für die Wechselstromwiderstände einer Spule aufzeichnen (Abb. 8.15) und wählen die Werte $R = 12 \Omega$ und $X_L = 52 \Omega$. 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 $Z = 53,5 \Omega$. Den Phasenwinkel φ messen wir mit dem Winkelmesser zu $\varphi = 77^\circ$.

Abb. 8.15 – Zeigerdiagramm für die Widerstände

8.2.2.6.2. Rechnerische Bestimmung

Eine rechnerische Bestimmung der Widerstände können wir mit Hilfe des Dreiecks M-A-B der Abb. 8.15 durchführen. Dieses Dreieck hat bei B einen rechten Winkel (90°). Im rechtwinkligen Dreieck gilt der Lehrsatz des Pythagoras. 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 und erhalten dann:

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

In dieser Formel bedeuten:

Z = Scheinwiderstand in Ω ,

R = Wirkwiderstand in Ω und

X_L = induktiver Blindwiderstand in Ω .

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 $\cos \varphi$. In Buchstaben ausgedrückt heißt das:

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

In dieser Formel bedeuten:

$\cos \varphi$ = Kosinuswert des Phasenwinkels φ , Einheit 1,

R = Wirkwiderstand in Ω und

Z = Scheinwiderstand in Ω .

Haben wir nur einen Wirkwiderstand im Stromkreis, 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:

$R = 12 \Omega$; $X = 52 \Omega$ (Das sind die Werte aus dem Diagramm Abb. 8.15)

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = \sqrt{52^2 + 12^2} = \sqrt{2848} = \underline{\underline{53,4 \Omega}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{12}{53,4} = 0,225; \text{ aus der Tabelle ergibt sich } \varphi = \underline{\underline{77^\circ}}$$

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 9Ω 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

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

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

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

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

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

8.2.3. Der Kondensator im Wechselstromkreis

Wir wollen bei dem Versuch nach Abb. 8.16 eine Glühlampe nacheinander mit Kondensatoren von 2, 4, 6, 8 und $10 \mu\text{F}$ in Reihe an das Lichtnetz (220 V) anschließen. Die Glühlampe leuchtet zunächst dunkler als normal. Bei Erhöhung der Kapazität wird das Leuchten zunehmend heller.

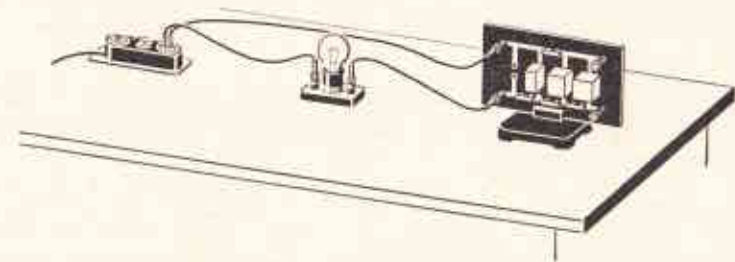


Abb. 8.16 – Abhängigkeit des kapazitiven Widerstands von der Größe der Kapazität

Aus diesem Vorgang ist zu 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.

8.2.3.1. Kapazitiver Widerstand und Frequenz

Der Versuch nach Abb. 8.17 soll uns zeigen, daß die Größe des kapazitiven Widerstands neben der Kapazität auch noch von der Frequenz abhängig ist. In dem

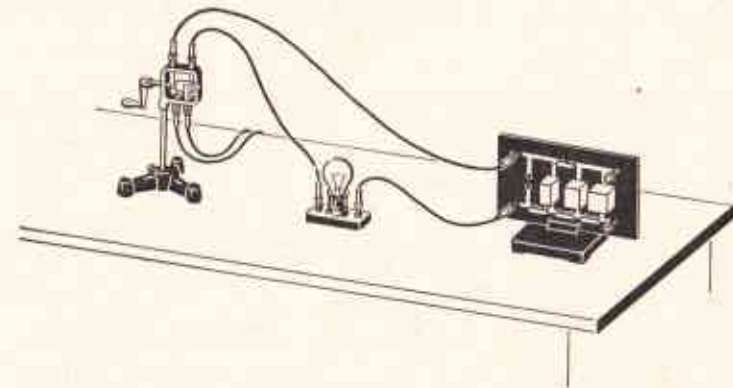


Abb. 8.17 – Abhängigkeit des kapazitiven Widerstands von der Frequenz

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 niedrigen; oder anders ausgedrückt, der kapazitive Widerstand wird mit wachsender Frequenz geringer.

Somit verhält sich der kapazitive Widerstand X_C umgekehrt wie die Frequenz f . In die Formel zur Errechnung des kapazitiven Widerstands ist die Kreisfrequenz einzusetzen (siehe auch Berechnung des induktiven Widerstands):

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

In dieser Formel bedeuten:

X_C = kapazitiver Blindwiderstand in Ω ,

C = Kapazität in F = $\frac{As}{V}$ und

$2 \cdot \pi \cdot f = \omega$ = Kreisfrequenz in $\frac{1}{s}$.

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.

Dafür besteht folgender Zusammenhang:

Wird an den Belägen eines Kondensators mit der Kapazität 1 Farad die Spannung in 1 Sekunde gleichmäßig um 1 Volt geändert, so fließt ein Verschiebungsstrom von 1 Ampere.

Anstelle der Einheit Farad kann man daher auch die Einheiten

$\frac{A \cdot s}{V}$ einsetzen.

Die Richtigkeit der Formel für die Berechnung des kapazitiven Blindwiderstands kann wiederum leicht bewiesen werden, wenn man die entsprechenden Einheiten einsetzt:

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

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

1. Beispiel:

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

Gegeben: $C = 0,000004 F$; $f = 50 Hz$

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 $f = 10 kHz$ soll ein kapazitiver Widerstand von $X_C = 6,4 k\Omega$ eingeschaltet werden. Wie hoch muß die Kapazität sein?

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

Gesucht: C

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

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

$$C = \frac{1}{401\,920\,000} \approx \underline{\underline{0,00000000249 F}}$$

$$C = \underline{\underline{2,49 nF}}$$

3. Beispiel:

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

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

Gesucht: f

Lösung: Wir erhalten wiederum nach Umstellen der Grundformel:

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

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

8.2.3.2. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

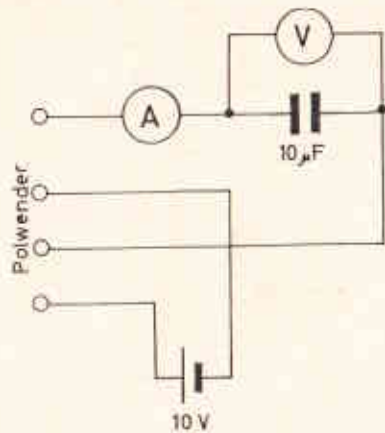


Abb. 8.18 – Die Phasenverschiebung durch eine Kapazität (Versuchsschaltung)

Wir wollen jetzt in der Weise, wie wir es mit einem rein ohmschen und einem rein induktiven Widerstand bereits getan haben, nach dem Schema der Abb. 8.18 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 ist zu erkennen:

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

Bei genauer Beobachtung erkennen wir, daß vom Zeitpunkt des Erreichens des Stromhöchstwerts bis zum Erreichen des Spannungshöchstwerts 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 Stroms gegen die Spannung eine Phasenverschiebung von 90° auf.

8.2.3.3. Liniendiagramm für Spannung und Strom an einer Kapazität

Ein Kondensator hat einen kaum feststellbaren sehr hohen Wirkwiderstand. Deshalb kann man ihn vernachlässigen und den Kondensator als einen rein kapazitiven Widerstand behandeln, dessen Phasenwinkel φ immer 90° beträgt. Dabei ist $\cos \varphi$ immer gleich Null. Abb. 8.19 zeigt das Liniendiagramm für Strom und Spannung an einem rein kapazitiven Widerstand.

Beim Kondensator ist also der Scheinwiderstand fast immer gleich dem kapazitiven Widerstand ($Z = X_C$). Damit ist die Berechnung des Scheinwiderstands, des Wirkwiderstands und des $\cos \varphi$ nicht notwendig.

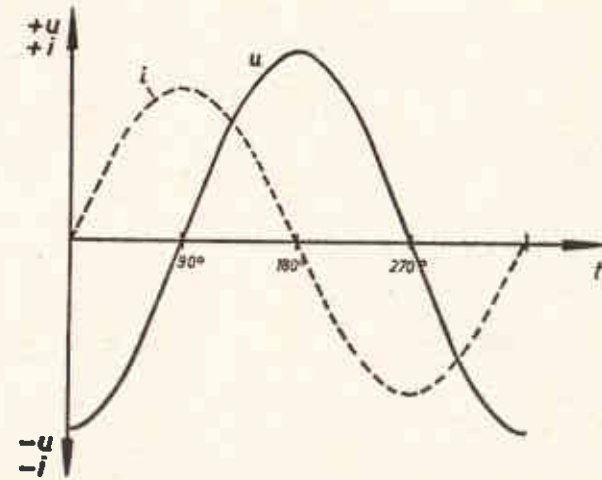


Abb. 8.19 – Phasenlage am kapazitiven Widerstand

Aus unseren bisherigen Erkenntnissen über die Widerstände im Wechselstromkreis entnehmen wir, daß der ohmsche Widerstand nicht frequenzabhängig 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.

8.3. Mehrphasenwechselstrom

8.3.1. Drehstrom

Werden zur Erzeugung eines Wechselstroms 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 eine Wechselspannung.

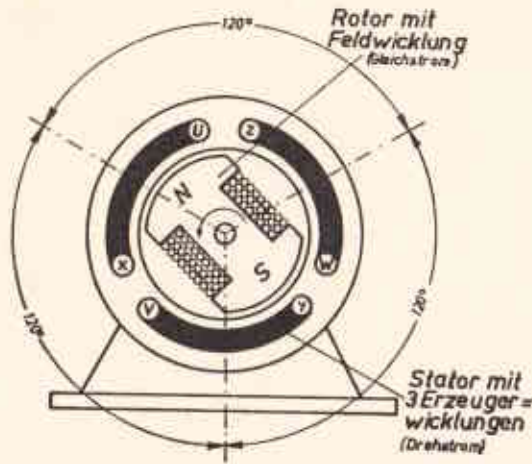


Abb. 8.20 – Drehstromgenerator (schematisch)

Die drei Wechselspannungen sind entsprechend der Spulenordnung um 120° gegeneinander phasenverschoben. Schließt man an die drei Generatorspulen je einen Verbraucher, so fließen drei Wechselströme I_R , I_S und I_T . Diese drei Verbraucherströme wollen wir ihrer Phasenlage entsprechend in ein Strom-Zeit-Diagramm zeichnen (Abb. 8.21).

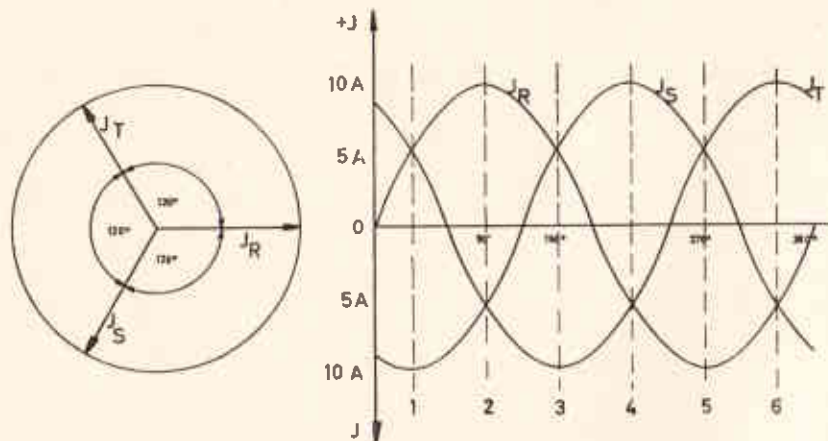


Abb. 8.21 – Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom)

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 einer 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

Wird der Stromhöchstwert, wie in Abb. 8.21 aufgetragen, mit 10 Ampere angenommen, ergibt sich für die Punkte 1 bis 6 des Diagramms jeweils folgender **Summenstrom**:

Pkt 1: $I_R = +5 \text{ A}$, $I_T = +5 \text{ A}$, $I_S = -10 \text{ A}$, Summe = 0 A
 Pkt 2: $I_R = +10 \text{ A}$, $I_S = -5 \text{ A}$, $I_T = -5 \text{ A}$, Summe = 0 A

Für die Punkte 3 bis 6 ergibt die Summe aller drei Wechselstromwerte ebenfalls stets den Gesamtstrom $I = 0$. Demnach könnte man also die drei Rückleitungen zum Verbraucher in der Abb. 8.22 zusammenlegen. In dieser Leitung würde kein Strom fließen, vorausgesetzt, daß die Belastung in den drei Spulenkreisen gleich groß ist. Man könnte noch einen Schritt weitergehen und den einzelnen Rückleiter auch noch fortlassen und statt dessen die Spulenenden X – Y – Z einfach miteinander verbinden.

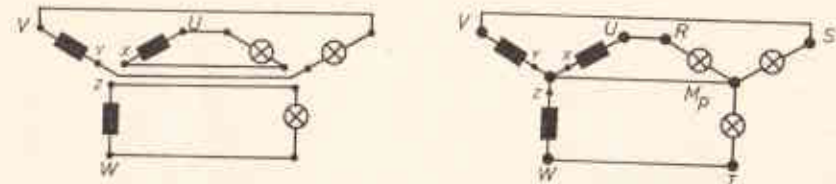


Abb. 8.22 – Drehstromnetz unverkettet bzw. verkettet

Im Betrieb ist die Belastung 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. 8.22). Sie sind sinngemäß in den drei Spulenanschlüssen U – V – W zugeordnet.

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

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 anstelle von sechs mit nur drei Leitern (bzw. vier einschließlich Mp) auskommt. Das bedingt eine große Einsparung. Daher werden fast alle Versorgungsnetze als Drehstromnetze gebaut.

8.3.1.1. Sternschaltung

In dem Versuch nach Abb. 8.23 sind die drei Außenleiter an drei Spulen mit je 1200 Windungen angeschlossen. Die Spulenenden sind miteinander verbunden, an die Verbindungsstelle ist der Mittelpunktstecker angeschaltet. Weil die drei Spulen in Form eines Sterns geschaltet sind, nennt man diese Schaltung die **Sternschaltung**. Den Anschaltspunkt für den Mittelpunktstecker bezeichnet man als **Sternpunkt**. Bei der Untersuchung dieser Schaltung stellen wir fest:

1. Bei gleicher Belastung der drei Außenleiter ist der Mittelpunktstecker stromlos.
2. Bei gleicher Belastung kann der Mittelpunktstecker 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 Mittelpunktstecker den Ausgleichsstrom auf.

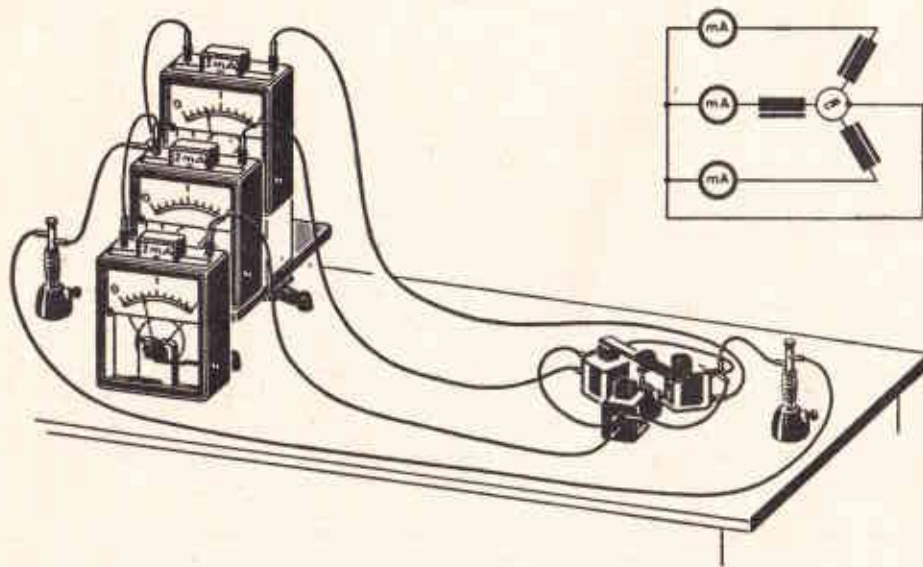


Abb. 8.23 – Sternschaltung

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

$$I_A = I_{ph}$$

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:

$$U_A = 1,73 \cdot U_{ph} \quad V$$

Bei einer Sternschaltung können immer zwei Spannungen abgenommen werden:

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

8.3.1.2. Dreieckschaltung

Bei dem Versuch nach Abb. 8.24 werden die drei Spulen so an die drei Außenleiter R, S, T angeschlossen, daß je ein Spulen-anfang einmal mit einem Außenleiter und zum anderen mit dem Ende der vorhergehenden Spule verbunden ist. Die drei

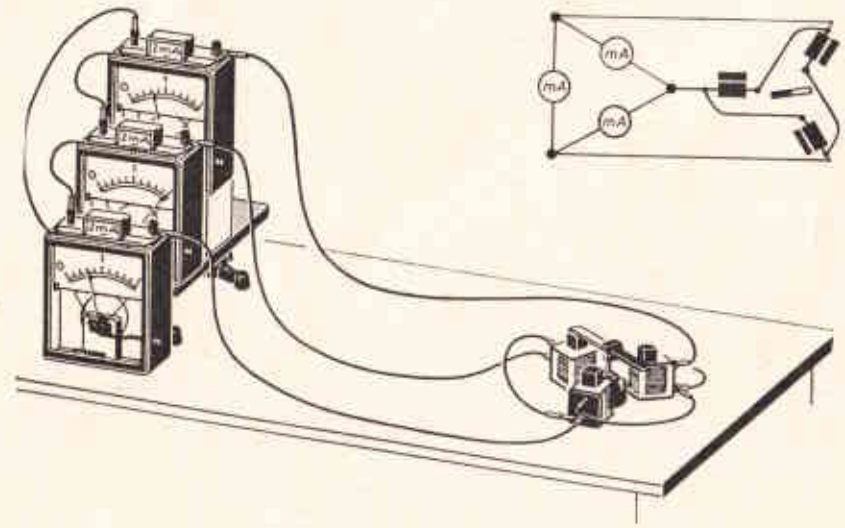


Abb. 8.24 – Dreieckschaltung

Spulen sowie die Meßinstrumente als Verbraucher sind hier in Form eines Dreiecks geschaltet, man nennt sie deshalb auch **Dreieckschaltung**. Bei dieser Schaltung wird kein Mittelpunktleiter verwendet, sie gilt also nur für gleichmäßige Belastung der drei Außenleiter.

Daraus ergibt sich:

1. Zur Versorgung dreier Verbraucher werden nur drei Einzelleitungen benötigt.
2. Bei gleicher Belastung ist der Strom in allen drei Leitern gleich groß.
3. Da die Verbraucher jeweils direkt mit einer Generatorspule verbunden sind, ist die Phasenspannung gleich der Außenspannung.

Würden wir jeweils Verbraucherstrom (Phasenstrom) und Strom in der Zuleitung (Außenstrom) messen, so ergäbe sich folgendes Verhältnis:

Der Außenstrom ist 1,73mal so groß wie der Phasenstrom.

$$I_{\Delta} = 1,73 \cdot I_{ph} \quad A$$

Die Messung von Außen- und Phasenspannung führt zu folgendem Ergebnis:

Die Spannung zwischen den Außenleitern ist gleich der Phasenspannung.

$$U_{\Delta} = U_{ph}$$

9. Der zusammengesetzte Wechselstromkreis

Im Abschn. 8.2 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.

9.1. Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen

9.1.1. Wirkwiderstand und induktiver Widerstand

Wir erinnern uns, 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, jetzt wollen wir es mit Hilfe des Pythagoreischen Lehrsatzes rechnerisch wiederholen. Aus dem Zeigerdiagramm der Abb. 9.1 entnehmen wir:

$$U^2 = U^2_w + U^2_L \quad \text{oder umgestellt}$$

$$U = \sqrt{U^2_w + U^2_L}$$

Vom Ohmschen Gesetz her ist bekannt, 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 und schreiben deshalb nach Umstellung

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

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

Es ist also:

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

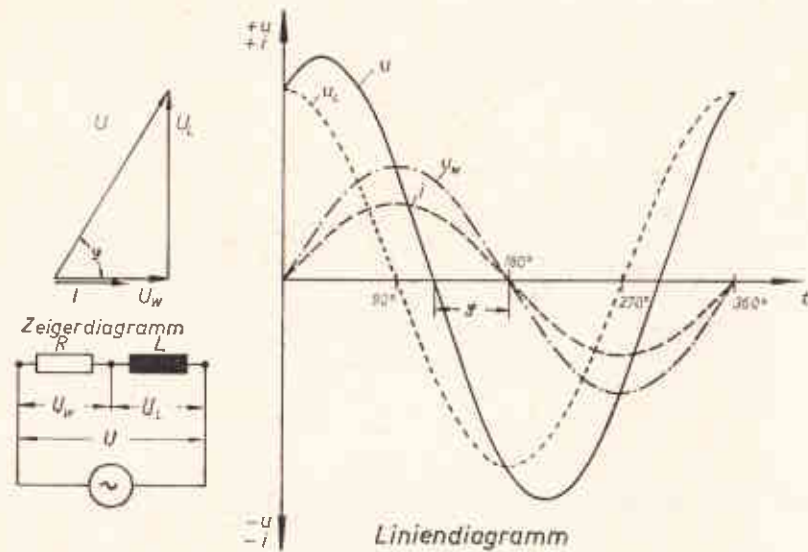


Abb. 9.1 – Reihenschaltung von R und L

Wenn wir die Phasenlage zwischen der Gesamtspannung U und dem Strom I errechnen wollen, können wir uns des Kosinus des Winkels φ bedienen. Aus unserem Zeigerdiagramm können wir also ableiten:

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

Wir fassen unsere Erkenntnisse nochmals zusammen:

Bei der Reihenschaltung von Wirkwiderstand und induktivem Widerstand eilt der Strom der Spannung nach. Dabei ergibt sich der Kosinus 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: $X_L = \omega L = 2 \pi f \cdot L$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 0,004 = \text{rd. } 20 \Omega$$

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

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

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

9.1.2. 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. 9.2, daß der Strom und der Spannungsabfall über dem Wirkwiderstand ($U_W = I \cdot R$) in Phase sind, während die Spannung am Kondensator dem Strom um 90° nacheilt. Es ist

$$U_C = I \cdot X_C$$

Aus dem Zeigerdiagramm kann man weiter entnehmen, daß

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

Nach dem Ohmschen Gesetz wird

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

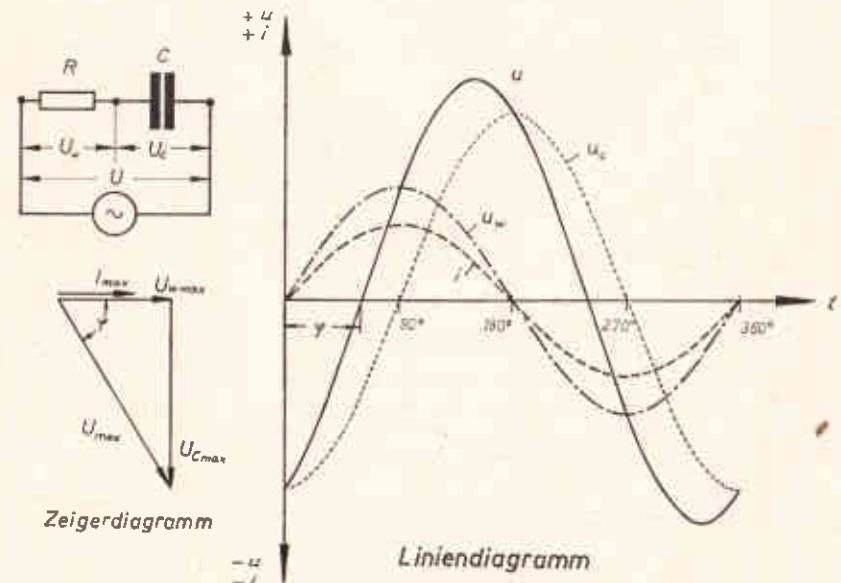


Abb. 9.2 – Reihenschaltung von R und C

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

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

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

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

Wir fassen unsere Erkenntnisse zusammen:

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

Beispiel:

Ein Kondensator von $C = 4 \mu F$ 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

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

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

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

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

9.1.3. Wirkwiderstand, induktiver und kapazitiver Widerstand

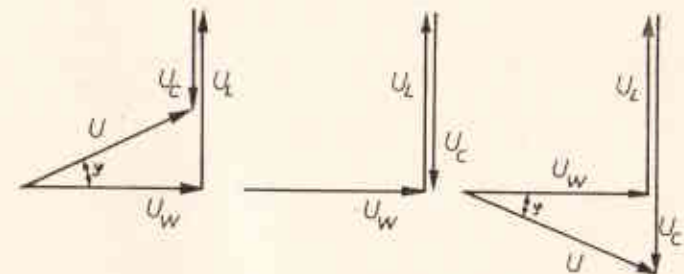
Die Widerstände werden in der in Abb. 9.3 gezeigten Weise hintereinandergeschaltet.



Abb. 9.3 – Reihenschaltung von R, L und C

Aus dem Zeigerdiagramm nach Abb. 9.4 ist zu 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. 9.4 ersieht man 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 waagrecht. Wie wir bereits festgestellt haben, eilt an einer Induktivität die Spannung dem Strom um 90° voraus. 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



a)

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

b)

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

c)

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

Abb. 9.4 – Spannungs-Zeigerdiagramm für die Reihenschaltung R, L und C

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. 9.4 können wir die Formel für den Scheinwiderstand ableiten:

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

Werden beide Seiten der Gleichung durch I geteilt, 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 wirkenden Blindwiderstand dar, so daß man setzen kann:

$$X_L - X_C = X.$$

Aus den Zeigerdiagrammen nach Abb. 9.4 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. 9.4a).

Ist der kapazitive Widerstand größer als der induktive, so eilt der Strom der Spannung voraus; der Phasenwinkel ist negativ (Abb. 9.4c).

Haben der induktive und der kapazitive Widerstand gleich große Werte, so ist nur der ohmsche Widerstand wirksam; der Phasenwinkel ist gleich Null (Abb. 9.4b) (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:

$$U = I \cdot Z \quad V$$

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

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

$$X_C = 31,8 \Omega$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9.1.4. Widerstandszeigerdiagramm

Im linken Teil der Abb. 9.5 ist ein Spannungszeigerdiagramm aufgezeichnet. Dabei ist der Strom I als der Bezugszeiger anzusehen, auf den die anderen Zeiger bezogen sind. Die Wirkspannung ist mit dem Strom in Phase. Senkrecht zu U_w ist die Blindspannung aufgetragen, die hier von dem gesamten Blindwiderstand, sowohl von dem induktiven als auch von dem kapazitiven, abhängig ist. U ergibt sich als Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks.

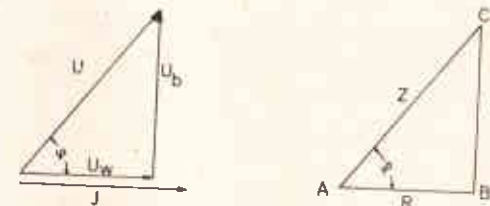


Abb. 9.5 – Spannungs- und Widerstandszeigerdiagramm

In einer Reihenschaltung fließt an jeder Stelle der gleiche Strom. Das gilt für die Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderständen sinngemäß. Somit dürfen wir alle drei Spannungen durch die gleiche Stromstärke I teilen und erhalten:

$$\frac{U_w}{I} = R \quad \text{bzw.} \quad \frac{U_b}{I} = X \quad \text{und} \quad \frac{U}{I} = Z.$$

Wenn aber die drei Spannungen durch den gleichen Strom geteilt worden sind, stehen die drei sich ergebenden Widerstände im gleichen Verhältnis wie die Spannungen. Es gilt also:

$$U_w : U_b : U = R : X : Z.$$

Die beiden zugehörigen Zeigerdiagramme weisen das gleiche Seitenverhältnis auf – es ergeben sich ähnliche Dreiecke. Damit stimmen auch die entsprechenden Winkel in beiden Dreiecken überein. Aus beiden Zeigerdiagrammen läßt sich der Phasenverschiebungswinkel φ ermitteln. Zur Darstellung des Widerstandszeigerdiagramms muß ein entsprechender Maßstab festgelegt werden.

Da Widerstände und Leistungen keine gerichteten Größen sind, werden diese Diagramme im allgemeinen ohne Pfeilspitzen gezeichnet.

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. 9.6 gekennzeichnet.)

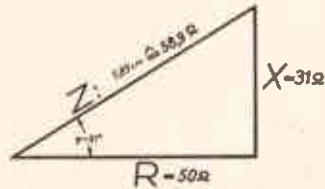
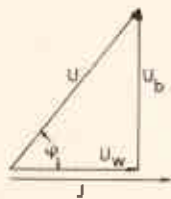


Abb. 9.6 – Widerstandszeigerdiagramm

9.1.5. 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. 9.7 können wir ableiten:



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

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

Abb. 9.7 – Spannungszeigerdiagramm

9.2. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen

Zur Berechnung der Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen muß man das Rechnen mit komplexen Zahlen beherrschen.

Jede Spule hat außer dem Blindwiderstand einen nicht vernachlässigbaren Wirkwiderstand. Das gilt sinngemäß auch für Kondensatoren, wenn man ihre Anwendung für höhere Frequenzen in der Fernmeldetechnik berücksichtigt. Die Parallelschaltung einer Spule mit einem Kondensator oder mit einem Wirkwiderstand stellt also eine Gruppenschaltung dar, die mit einfachen Berechnungsmethoden nicht mehr zu erfassen ist. Lediglich die Berechnung von Parallelschaltungen aus Kondensatoren mit Wirkwiderständen führt für niedrige Frequenzen (etwa bis in den Tonfrequenzbereich) zu ausreichend genauen Ergebnissen. Dagegen stellt das Ersatzschaltbild eines Elektrolytkondensators eine Gruppenschaltung dar, de-

ren Berechnung nur komplex möglich ist. Bereits einfache Versuche über die Parallelschaltung bei 50-Hz-Wechselstrom – z. B. Phasenkompensation zur $\cos \varphi$ -Verbesserung – führen zu erheblichen Differenzen zwischen gemessenen und den durch vereinfachte Berechnung ermittelten Werten.

Im Rahmen dieses Bandes soll deshalb die Parallelschaltung nur behandelt werden, soweit sie für die Resonanz von Bedeutung ist (vgl. hierzu deshalb Abschn. 9.4.2 „Parallelresonanz“).

9.3. 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.

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 Abschnitten 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 $1 \text{ cm} \hat{=} 40 \text{ V}$ bzw. $1 \text{ cm} \hat{=} 8 \text{ A}$. Unterschiede ergeben sich also nur aufgrund der durch die verschiedenen Widerstände verursachten Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

9.3.1. Leistungsaufnahme eines Wirkwiderstands

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

Zeichnet man das Liniendiagramm für Spannungs- und Stromverlauf an einem Wirkwiderstand und bildet für jeden Augenblick das Produkt aus Spannung mal Strom, so erhält man ein Liniendiagramm für die Leistung (Abb. 9.8).

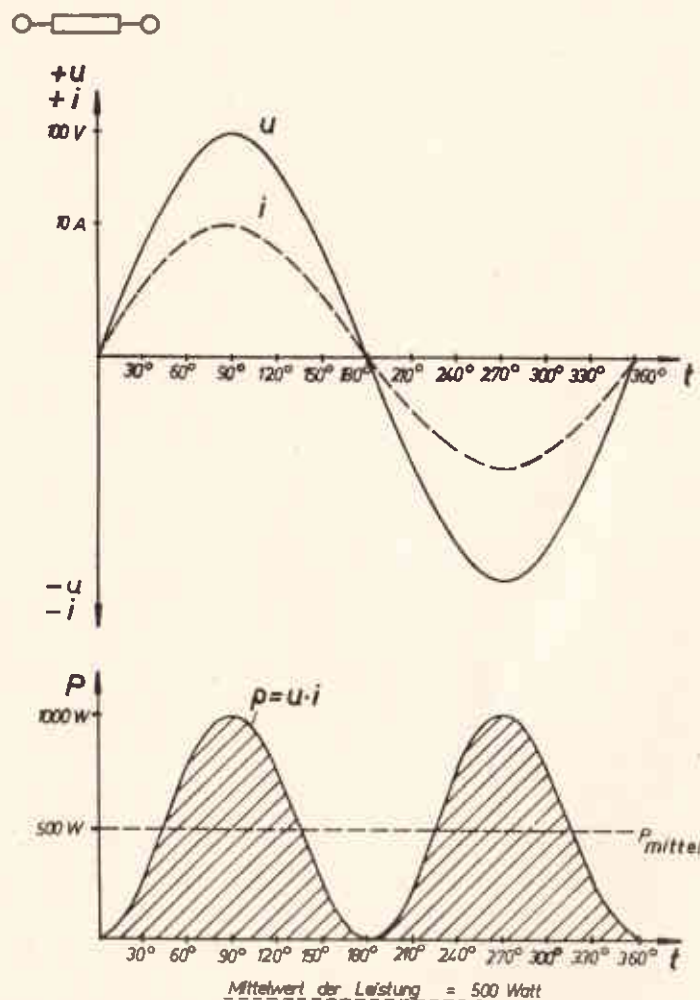


Abb. 9.8 – Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für einen Wirkwiderstand

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 Wirkwiderstands:

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

In dieser Formel bedeuten:

P = Wirkleistung in W,

U_{eff} = Effektivwert der Wechselspannung in V und

I_{eff} = Effektivwert des Wechselstroms in A.

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, elektrische Kochplatten, elektrische Heizungen.

9.3.2. Leistungsaufnahme einer Induktivität

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

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

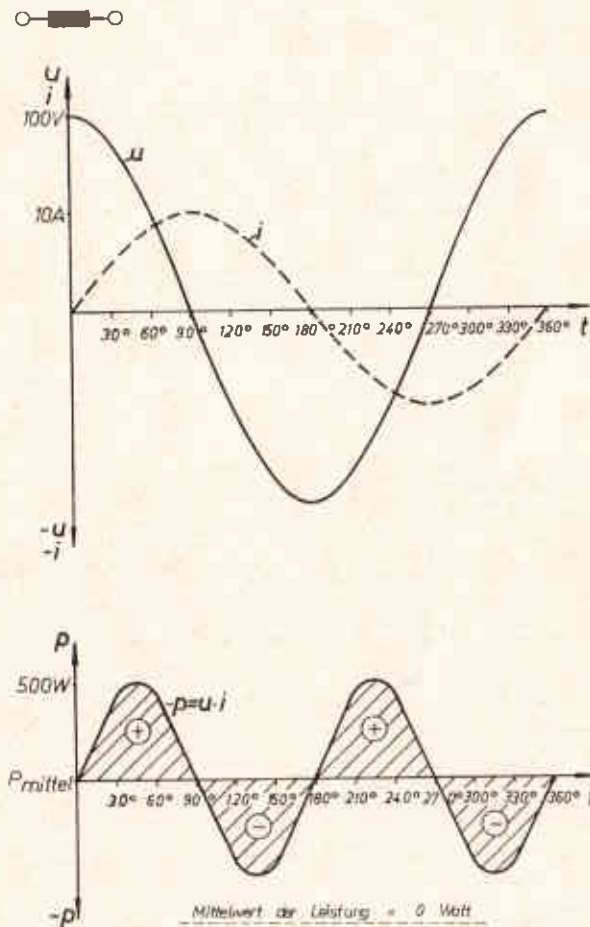


Abb. 9.9 – Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für eine Induktivität

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.

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 aufgenommen und an die Energiequelle zurückgegeben wird, auch als Blindleistung.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Blindleistung	Q	var (Voltampere reactiv ¹⁾)

9.3.3. Leistungsaufnahme einer Kapazität

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 (vgl. hierzu Abb. 9.10).

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:

Ein reiner Blindwiderstand nimmt nur Blindleistung auf.

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

¹⁾ reactiv = rückwirkend

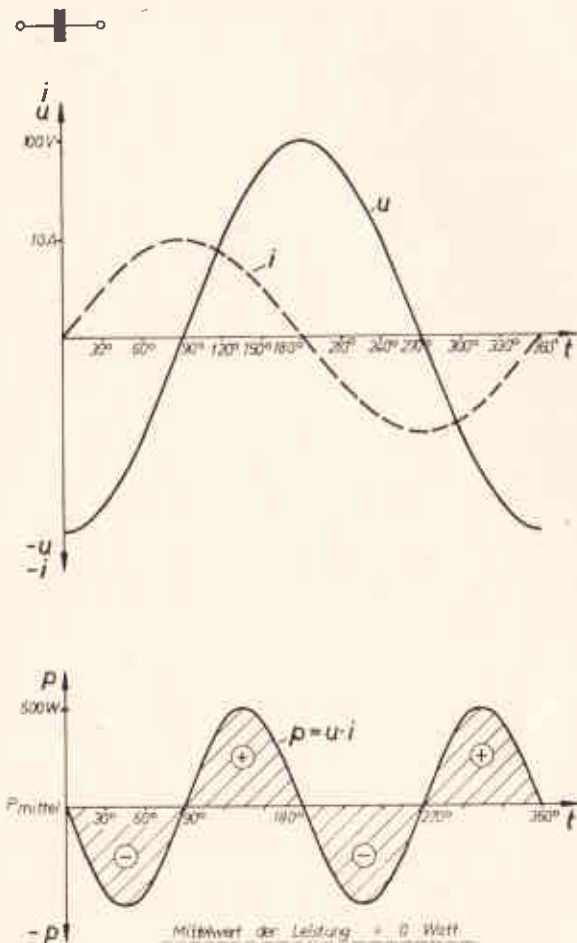


Abb. 9.10 – Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für eine Kapazität

9.3.4. Leistungsaufnahme einer Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderstand

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

stände 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“ (vgl. hierzu Abb. 9.11).

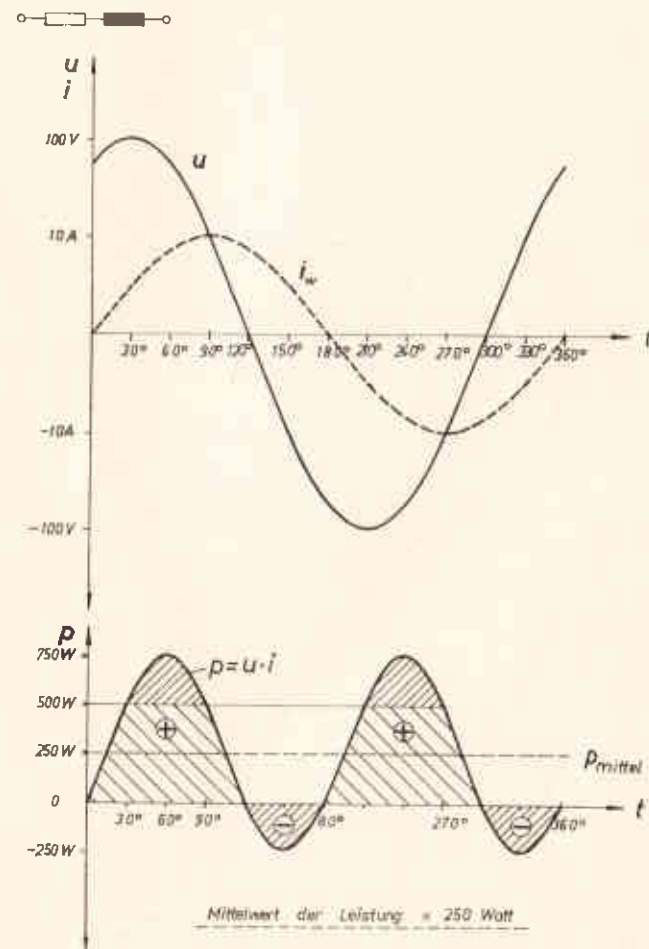


Abb. 9.11 – Spannungs-, Strom- und Leistungsdiagramm für eine Reihenschaltung aus Wirk- und Blindwiderstand

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.

9.3.5. Folgerungen aus den Beispielen 9.3.1 bis 9.3.4

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:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{W}$$

In dieser Formel bedeuten:

P = Wirkleistung in W,
 U = Effektivwert der Wechselspannung in V,
 I = Effektivwert des Wechselstroms in A und
 $\cos \varphi$ = Leistungsfaktor, Einheit 1.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	1

Für unsere Beispiele ergibt sich:

Wirkwiderstand: Gegeben: $U_{\max} = 100 \text{ V}$, daher $U_{\text{eff}} = 70,7 \text{ V}$;
 $I_{\max} = 10 \text{ A}$, daher $I_{\text{eff}} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = 0^\circ$; $\cos \varphi = 1$.
 $P = 70,7 \text{ V} \cdot 7,07 \text{ A} \cdot 1 = \underline{\underline{500 \text{ W}}}$

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

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

Reihenschaltung aus Blind- und Wirkwiderstand:

Gegeben: $U_{\text{eff}} = 70,7 \text{ V}$; $I_{\text{eff}} = 7,07 \text{ A}$;
 $\varphi = +60^\circ$; $\cos \varphi = 0,5$.
 $P = 70,7 \text{ V} \cdot 7,07 \text{ A} \cdot 0,5 = \underline{\underline{250 \text{ W}}}$

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. hierzu Abb. 9.12).

Für die Widerstände einer Reihenschaltung gilt:

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

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

$$I^4 Z^2 = I^4 R^2 + I^4 X^2 \text{ oder } (I^2 \cdot Z)^2 = (I^2 \cdot R)^2 + (I^2 \cdot X)^2.$$

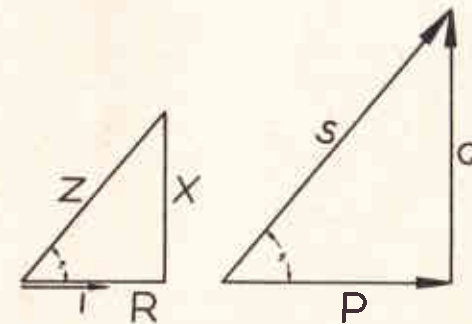


Abb. 9.12 – Widerstands- und Leistungs-Zeigerdiagramm

Dafür kann man setzen

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

In dieser Formel bedeuten:

S = Scheinleistung in VA,
 P = Wirkleistung in W und
 Q = Blindleistung in var.

Es ist daraus zu erkennen, 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. 9.12) sind also ähnliche Dreiecke; d. h., sie stimmen in den drei Winkeln überein.

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: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$= \frac{U_w^2}{R} = I_w^2 \cdot R$	W
Scheinleistung: $S = U \cdot I$	$= \frac{U^2}{Z} = I^2 \cdot Z$	VA
Blindleistung: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	$= \frac{U_b^2}{X} = I_b^2 \cdot X$	var

In diesen Formeln bedeuten:

U = Effektivwert der Gesamtspannung in V,
 I = Effektivwert des Gesamtstroms in A,
 U_w = Spannung am Wirkwiderstand R in Ω ,
 I_w = Strom, der durch den Wirkwiderstand R fließt, in A,
 U_b = Spannung am Blindwiderstand X in V,
 I_b = Strom, der durch den Blindwiderstand X fließt, in A, und
 φ = Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{VA}$$

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

der Widerstände:

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

der Spannungen:

$$\cos \varphi = \frac{U_w}{U}$$

oder

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

Die Wirkleistung beträgt $P = 106 \text{ W}$.

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 Sinuswert von $\sin 31^\circ 50' = 0,5275$.

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

Die Blindleistung beträgt $Q = 53,4 \text{ kvar}$.

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: $S^2 = P^2 + Q^2$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

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

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

Der Leistungsfaktor beträgt $\cos \varphi = 0,86$.

9.3.6. 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 Grundscheidungsarten:

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:

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

b) bei der Dreieckschaltung:

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

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

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

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

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 immer die Außenspannung und der Außenstrom einzusetzen sind. Diese beiden Werte können auch am einfachsten gemessen werden.

Wirkleistung im Drehstromkreis:

$$P = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{W}$$

In dieser Formel bedeuten:

- P = Wirkleistung in W,
- $1,73$ = Verkettungsfaktor, Einheit 1,
- U = Außenleiterspannung in V,
- I = Außenleiterstrom in A und
- $\cos \varphi$ = Leistungsfaktor, Einheit 1.

Beispiel:

Ein Drehstrommotor für eine Spannung von 380 Volt nimmt bei einem $\cos \varphi = 0,82$ 1,2 Ampere Strom auf. Wie groß ist die aufgenommene Leistung?

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

Gesucht: P

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

Die aufgenommene Leistung beträgt $P = 647 \text{ W}$.

9.3.7. 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.

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

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

9.3.8. 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 (elektrische 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

$$Q_C = Q_L.$$

Ein Phasenschieberkondensator muß also 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.

9.4. Resonanz

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

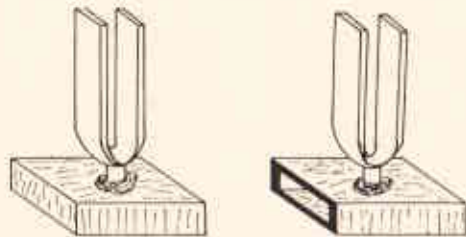


Abb. 9.13 – Resonanz zweier Stimmgabeln

Wir nehmen zwei Stimmgabeln mit dem Kammerton a und stellen sie in geringer Entfernung einander gegenüber (Abb. 9.13). Nachdem wir die erste Stimmgabel zum Erklängen 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.

9.4.1. Reihenresonanz

Zunächst wollen wir noch einen Versuch mit hintereinandergeschalteten Wechselstromwiderständen nach Abb. 9.14 durchführen. Wir schalten zu Beginn einen ohmschen Widerstand und einen Kondensator in Reihe. Mit dem gleichen Widerstand schalten wir nun statt des Kondensators eine Spule mit U-Kern in Reihe. Erhöhen wir die Induktivität der Spule, indem wir ein Joch über den U-Kern schieben, so sinkt der Strom.

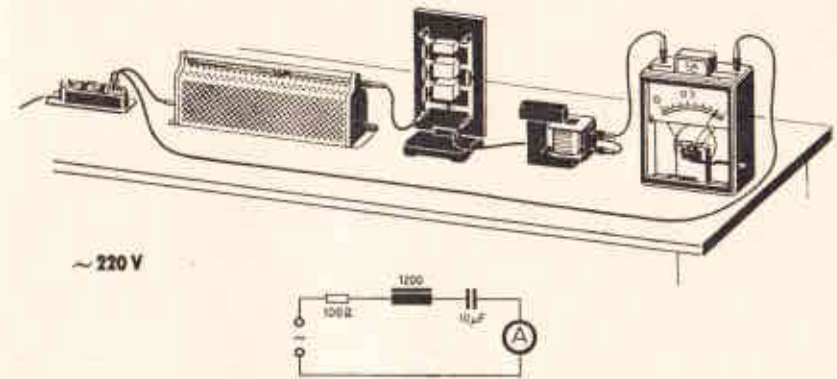


Abb. 9.14 – Reihenresonanzkreis (Versuchsaufbau)

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.

Aus dem Versuch ist zu erkennen:

Bei der Reihenschaltung von induktiven und 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 den Versuchsergebnissen ergibt sich, daß bei ausschließlicher Wirksamkeit des ohmschen Widerstands X_L und X_C gleich groß sein müssen. 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 f_0 .

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

Die Blindwiderstände X_L und X_C sind frequenzabhängig

$\left(X_L = 2\pi f \cdot L; X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \right)$. Damit ist auch der Resonanzfall frequenzabhängig. Er tritt also nur für einen bestimmten Wert der Frequenz ein, nämlich für die Resonanzfrequenz. Für diese Resonanzfrequenz ist der Widerstand der Reihenschaltung am geringsten, er ist gleich dem ohmschen Widerstand. Für jede andere Frequenz, gleichgültig ob höher oder tiefer, wird der Widerstand größer.

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

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:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Hz}$$

In dieser Formel bedeuten:

- f_0 = Resonanzfrequenz in Hz,
- $2 \cdot \pi$ = Umrechnungsfaktoren, Einheit 1,
- L = Induktivität in H und
- C = Kapazität in F.

Die Formel wird nach dem englischen Physiker Thomson die **Thomson-sche Schwingungsformel** genannt.

Anhand eines Beispiels wollen wir die Blindspannungen eines Reihenresonanzkreises ermitteln.

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: $U = 220 \text{ V}$; $L = 0,2 \text{ H}$; $C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}$; $R = 22 \Omega$

Gesucht: f_0 ; I ; U_L ; U_C

Lösung: Nach der Thomsonschen Formel ist

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}}$$

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

Im Resonanzfall ist $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ und damit $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, d. h., $Z = R$.

Für den Wert des Stroms 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

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

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

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**.

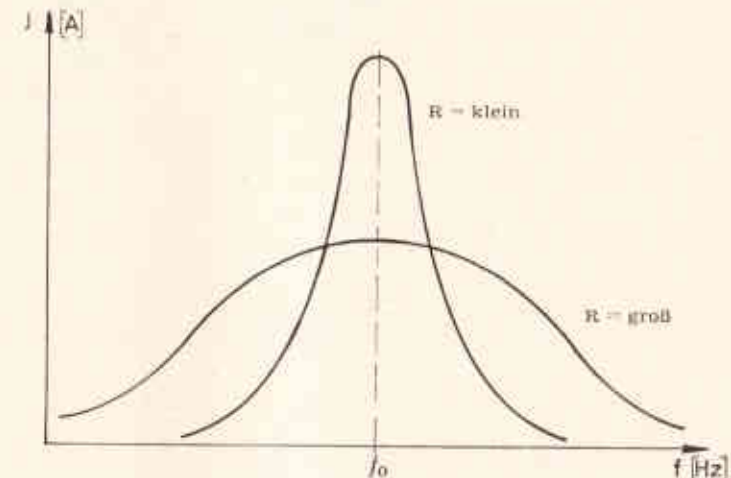


Abb. 9.15 – Reihenresonanz-Kurven

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

Abb. 9.15 zeigt zwei Resonanzkurven für Reihenresonanzkreise mit verschieden großem Wirkwiderstand R . 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 schmalen Durchlaßbereichs muß der ohmsche Widerstand sehr klein gehalten werden (vgl. hierzu Abb. 9.15).

9.4.2. Parallelresonanz

Bei dem Versuch nach Abb. 9.16 wollen wir der Einfachheit halber den ohmschen Widerstand vernachlässigen; in manchen Fällen kann man das in der Praxis auch tun.

Zuerst schließen wir einen Kondensator an das Netz an; das Amperemeter zeigt einen bestimmten Strom an. Legen wir statt des Kondensators eine Spule mit geschlossenem Eisenkern an das Netz, so zeigt das Instrument einen wesentlich geringeren Strom an.

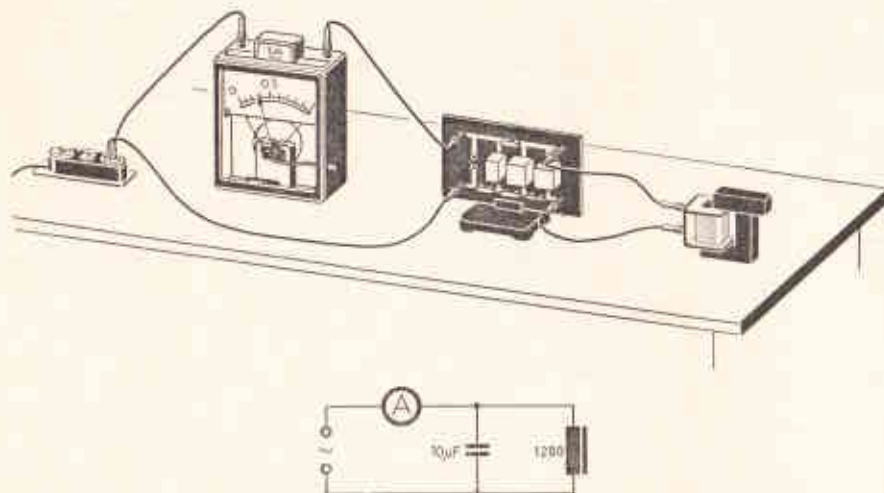


Abb. 9.16 – Parallelresonanzkreis (Versuchsaufbau)

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 Zurückziehen des Joches einen Mindestwert; bei weiterem Zurückziehen des Joches steigt der Wert des Stroms 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 Wirkwiderstands reiner Blindstrom. Im Resonanzfall sind der induktive und der kapazitive Blindstrom um 180° gegeneinander verschoben und heben sich damit auf (Mindestwert des Stroms beim Versuch nach Abb. 9.16). Man spricht deshalb auch von der **Stromresonanz**.

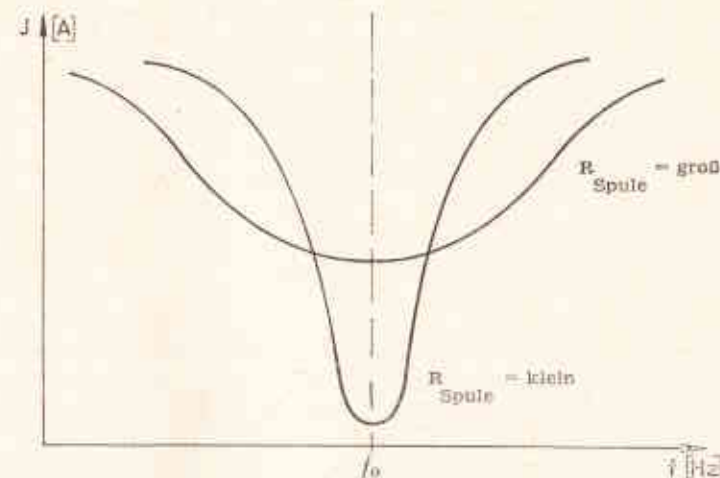


Abb. 9.17 – Parallelresonanz-Kurven

Die Resonanzkurve der Parallelresonanz (Abb. 9.17) 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 Resonanzfre-

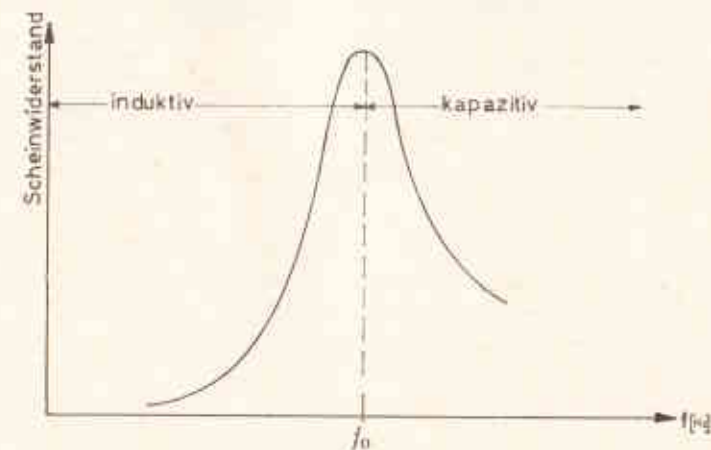


Abb. 9.18 – Scheinwiderstand eines Parallelresonanzkreises in Abhängigkeit von der Frequenz

quenz muß daher ebenso steil ansteigen, wie die Stromkurve abfällt (Abb. 9.18). Widerstand und Strom stehen im umgekehrten Verhältnis.

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

9.5. 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.

9.5.1. Tiefpaß

Eine Schaltungsanordnung von Induktivitäten und Kapazitäten nach dem Schema der Abb. 9.19 nennt man **Tiefpaß**. Die hintereinandergeschalteten Induktivitäten L_1 und L_2 bezeichnet man als **Längsinduktivitäten**, während die quer zur Leitung liegenden Kapazitäten **Querkapazitäten** genannt werden.

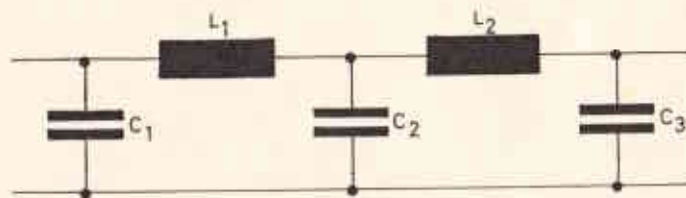


Abb. 9.19 – Tiefpaß

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**.

9.5.2. Hochpaß

Das Schema der Abb. 9.20 stellt einen Hochpaß dar. Im Gegensatz zum Tiefpaß haben wir hier **Längskapazitäten** und **Querinduktivitäten**.

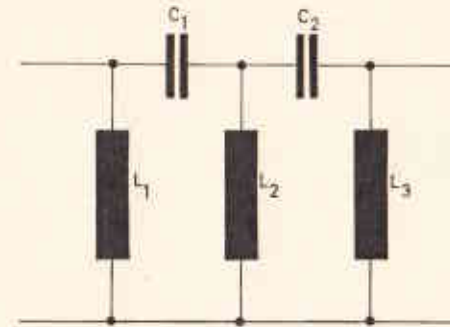


Abb. 9.20 – Hochpaß

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 **Kondensator-kette** genannt.

9.5.3. 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 Schaltungsmöglichkeiten von Induktivitäten und Kapazitäten. Eine davon ist in Abb. 9.21 wiedergegeben. **Die Wirkung der Bandfilter beruht auf der Wirkung der Reihenresonanz und der Parallelresonanz.**

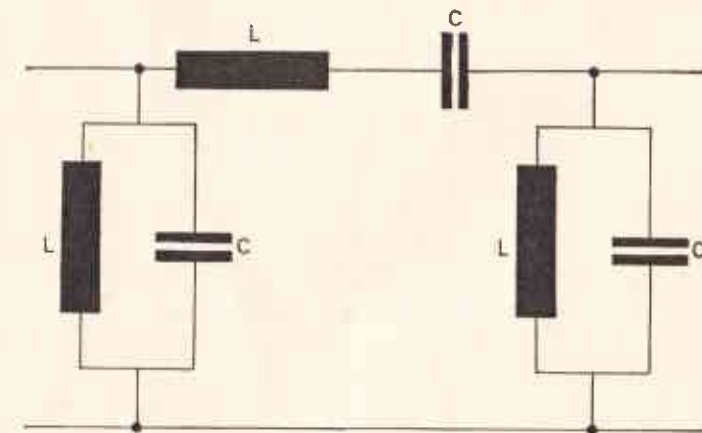


Abb. 9.21 – Bandfilter (Bandpaß)

9.5.4. Siebketten

Wie Abb. 9.22 zeigt, ist eine **Siebkette** ähnlich wie ein Tiefpaß aufgebaut. Siebketten haben die Aufgabe, die Welligkeit des durch Gleichrichtung von Wechselstrom gewonnenen pulsierenden Gleichstroms auszugleichen.

In jeder Gleichrichteranlage finden wir Siebketten, weil z. B. zum Betrieb von Röhren- oder Transistorverstärkern, Rundfunk- und Fernsehgeräten oder zum Fernsprechen reiner Gleichstrom benötigt wird.

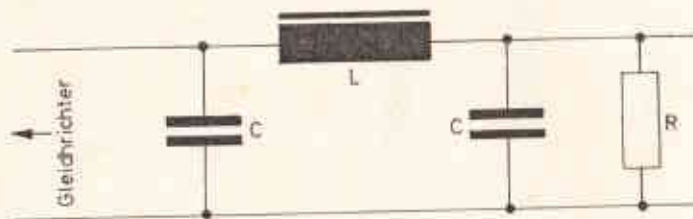


Abb. 9.22 – Siebkette

Bei geringem Strombedarf wird die Drosselspule L der Siebkette häufig aus wirtschaftlichen Gründen durch einen ohmschen Widerstand ersetzt (z. B. Netzgleichrichter in Rundfunk- und Fernsehgeräten).

10. Die Messung elektrischer Größen

Die Elektrotechnik, ein Teilgebiet der Physik, ist ohne Messungen nicht denkbar. Da diese Messungen nicht unmittelbar, sondern nur mittelbar durchgeführt werden können, sind zum Messen elektrischer Größen besondere Meßgeräte mit empfindlichen Meßwerken entwickelt worden.

Die VDE-Vorschriften 0410 geben hier folgende Erklärung:

- a) **Meßgerät ist ein Meßinstrument zusammen mit sämtlichem Zubehör**, also auch mit solchem, das nicht untrennbar mit dem Instrument verbunden, sondern getrennt vorhanden ist.
- b) **Meßinstrument ist das Meßwerk zusammen mit dem Gehäuse und gegebenenfalls eingebautem Zubehör**. Ein Meßinstrument kann auch mehrere Meßwerke enthalten.
- c) **Ein Meßwerk besteht aus den eine Bewegung erzeugenden Teilen und den Teilen, deren Bewegung oder Lage von der Meßgröße abhängt**. (Zum Meßwerk gehören z. B. auch Zeiger und Skala.)

Die Grundbegriffe der Meßtechnik sind in DIN 1319 festgelegt.

Nach den zu messenden elektrischen Größen unterscheidet man:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Spannungsmesser, | 5. Arbeitsmesser, |
| 2. Strommesser, | 6. Frequenzmesser und |
| 3. Widerstandsmesser, | 7. Dämpfungsmesser. |
| 4. Leistungsmesser, | |

10.1. Allgemeines über den Aufbau von Meßinstrumenten und Meßwerken

Am meisten gebräuchlich sind Zeigerinstrumente. Bei ihnen wird die Meßgröße durch Zeigerausschlag gekennzeichnet und angezeigt. Der Zeiger ist zu diesem Zweck mit dem beweglichen Teil des Meßwerks verbunden. Eine Variante zum Zeigermeßwerk ist das Lichtzeigermeßwerk. Sein Vorteil liegt darin, daß der Lichtzeiger gewichtslos ist und daher keine Massenträgheit besitzt. Beim Zungenfrequenzmesser dagegen wird die Meßgröße durch das Schwingen von Stahlzungen angezeigt.

Neuordings werden auch für besondere Zwecke Meßinstrumente mit Digitalanzeige verwendet. Digitalanzeige bedeutet soviel wie ziffernmäßige Anzeige des Meßwerts, wobei sich die Änderung jeweils schrittweise, also sprunghaft vollzieht. Im Gegensatz dazu bezeichnet man die Anzeige eines Zeigermeßwerks als Analoganzeige (analog = entsprechend, gleichartig). Abb. 10.1 veranschaulicht den Unterschied zwischen der Analoganzeige eines Zeigerinstrumentes und der Digitalanzeige.

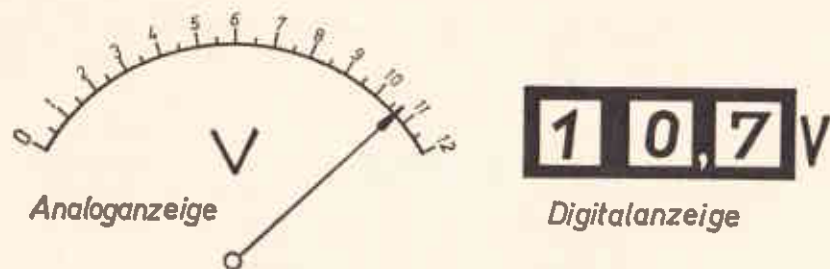


Abb. 10.1 – Vergleich zwischen Analoganzeige und Digitalanzeige

Die Digitalanzeige scheint auf den ersten Blick sehr vorteilhaft zu sein. Sie ist aber nur dort anwendbar, wo es z. B. auf die Überwachung einer Meßgröße ankommt, die normalerweise als konstant anzusehen ist. Eine unmittelbare Digitalanzeige durch Meßwerke würde einen zu großen Energieaufwand erfordern. Daher sind z. B. Verstärker erforderlich.

Sobald Größen gemessen werden sollen, die sich während des Meßvorgangs mehr oder weniger verändern können, ist die Analoganzeige geeigneter. Ebenso lassen sich durch eine Analoganzeige Bereiche, in denen der Meßwert schwankt, viel besser übersehen.

Bei den Zeigermessinstrumenten ist heute eine derartige Vielfalt an Zeiger- und Skalenformen gebräuchlich, daß hier nur eine Auswahl der am häufigsten vorkommenden Bauformen erläutert werden kann.

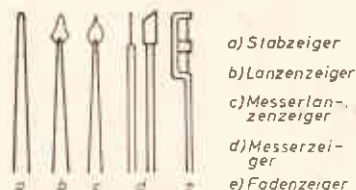


Abb. 10.2 – Zeigerformen

Eine Besonderheit bei Skalen für elektrische Meßinstrumente ist die **Spiegelskala**. Sie wird überwiegend in Feinmeßinstrumente eingebaut und besteht aus der üblichen Skala mit einem darunter befindlichen Spiegelbogen. Bei den einfachen Skalen können leicht dadurch Ablesefehler entstehen, daß man etwas schräg auf die Skala blickt und wegen des mehr oder weniger großen Abstands zwischen Zeiger und

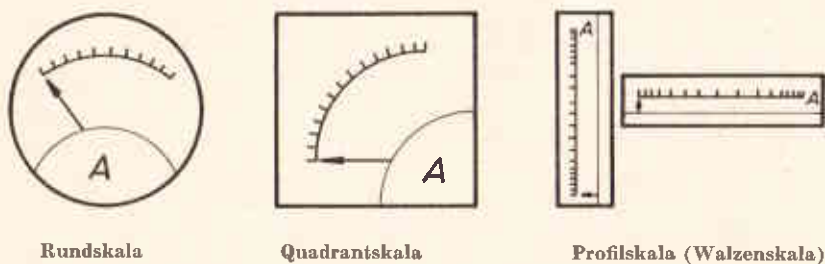


Abb. 10.3 – Skalenformen

Skala einen ungenauen Wert abliest. Die Spiegelskala läßt diesen Fehler vermeiden, wenn man beim Ablesen des Meßwerts darauf achtet, daß sich der Zeiger mit seinem Spiegelbild genau deckt. Das ist aber nur der Fall, wenn man genau senkrecht auf Zeiger und Skala blickt.

Weiterhin ist zwischen Einbauminstrumenten (z. B. Schalttafelinstrumenten) und tragbaren Instrumenten zu unterscheiden.

Grundsätzliche Unterschiede bestehen auch bei den Lagerungen des beweglichen Teils eines Meßwerks: So unterscheidet man zwischen Spitzen-, Zapfen- oder Spannband-Lagerung und Bandaufhängung.

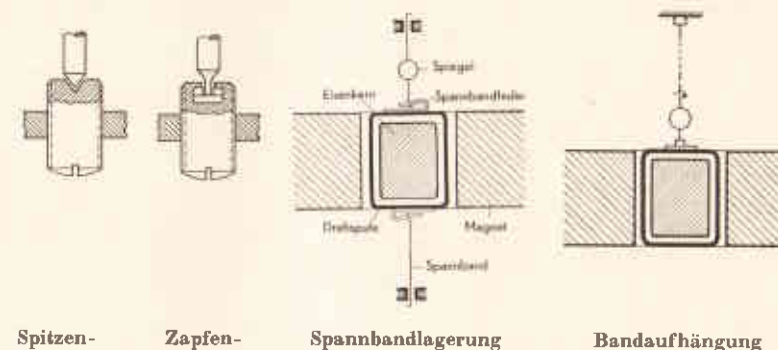


Abb. 10.4 – Lagerungen für den beweglichen Meßwerkteil

(Werkbild Hartmann & Braun AG)

Die Spitzen- und Zapfenlagerung ist auch z. B. im Uhrenbau üblich. Da bei starken Erschütterungen die sehr feinen Spitzen brechen können, bevorzugt man für Betriebsinstrumente, die Erschütterungen ausgesetzt sind, die Zapfenlagerung. Die Reibungsverluste durch Spitzen- oder Zapfenlagerung sind erheblich größer als bei der Spannbandlagerung. Zudem sind diese Reibungsverluste meistens auch noch lageabhängig. Daher ist mit Spitzen- oder Zapfenlagerung keine so große Meßgenauigkeit zu erwarten wie mit der Spannbandlagerung. Konstruktionselemente zur Bedämpfung des Zeigerpendelns sind im allgemeinen auf die Art des betreffenden Meßwerks zugeschnitten. Sie werden im Zusammenhang mit den Meßwerktypen besprochen.

Die Wirkungsweise der meisten elektrischen Meßwerke ist auf die

- elektrodynamische Kraftwirkung (Drehspul- und elektrodynamisches Meßwerk),
- elektromagnetische Kraftwirkung (Drehisenmeßwerk und Zungenfrequenzmesser),
- elektrostatische Kraftwirkung (elektrostatisches Meßwerk) oder
- Wärmewirkung des elektrischen Stroms (Hitzdrahtamperemeter)

zurückzuführen.

10.2. Meßwerke

10.2.1. Drehspulmeßwerk

10.2.1.1. Physikalische Grundlagen zur Arbeitsweise

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem konzentrischen Magnetfeld umgeben, dessen Feldlinienrichtung nach der Korkenzieherregel zu bestimmen ist. Befindet sich der stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld, so wirkt auf ihn eine Kraft – er wird bewegt. Die Richtung, in die er dabei bewegt wird, hängt von der Feldlinienrichtung des äußeren Magnetfelds und von der Stromrichtung im Leiter ab. Am einfachsten läßt sich die Bewegungsrichtung des stromdurchflossenen Leiters anhand der Linken-Hand-Regel (Motor-Regel) ermitteln. Ändert sich die Stromrichtung im Leiter, so ändert sich auch die Richtung, in die der Leiter abgelenkt wird.

Die Kraft F , mit der der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld bewegt wird, hängt von der magnetischen Induktion B des äußeren Magnetfelds, der wirksamen Leiterlänge l und von der Stromstärke I im Leiter ab. Wir können dafür folgende Formel schreiben:

$$F = B \cdot l \cdot I.$$

Aus der Formel erkennt man, daß z. B. bei Verdopplung der Stromstärke die Kraft ebenfalls verdoppelt wird. Darin liegt die lineare Skalenteilung des Drehspulmeßwerks begründet. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß das äußere Magnetfeld homogen ist, was durch besondere Konstruktionsmerkmale (Polschuhe, Eisenkern) erreicht wird. Ordnet man anstelle eines einzelnen Leiters eine drehbar gelagerte Spule im homogenen Magnetfeld an, so erhält sie bei Stromdurchgang einen Drehantrieb.

Gegenkraft/Rückstellkraft

Wird ein Körper durch eine Kraft beschleunigt, so würde er sich ständig weiterbewegen, wenn er nicht gebremst würde. Die drehbar gelagerte Spule würde also durch einen geringen Stromstoß in eine Drehbewegung geraten. So wäre aber eine Messung z. B. der Stromstärke nicht möglich. Damit die Kraft, mit der die Spule bewegt wird, gemessen werden kann, muß eine Gegenkraft vorhanden sein. Diese Gegenkraft wird meistens durch die Spannkraft von Spiralfedern oder die Torsionskraft von Spannbändern gebildet. Die Bedeutung und Wirkungsweise der Spiralfedern oder Spannbänder kann man sehr einfach aus der Wirkungsweise einer Federwaage ableiten. Da nun der Drehbewegung der stromdurchflossenen Spule die Spannkraft der Federn entgegenwirkt, kann sie nur so weit gedreht werden, bis die Drehkraft der Spule mit der Spannkraft der Federn im Gleichgewicht ist (die Kräfte also gleich groß sind). Der Ausschlagwinkel eines an der Spule befestigten Zeigers ist ein Maß für die Kraft, mit der sie bewegt wird. Die Spiralfedern bzw. Spannbänder sorgen zudem dafür, daß die Spule nach dem Ausschalten des Stroms in ihre Ausgangslage zurückgeführt wird (Rückstellkraft).

Dämpfung

Beim Einschalten des Stroms würde sich die Massenträgheit der Drehspule einschließlic des Zeigers nachteilig auswirken. Der Zeiger würde über den wirklichen Anzeigewert hin ausschlagen und dann pendeln. Um das zu verhindern, benötigt ein Zeigermeßwerk eine Dämpfung. Zur Dämpfung des Zeigerpendelns bedient man sich beim Drehspulmeßwerk der Kurzschlußdämpfung.

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm infolge Änderung des magnetischen Flusses ein Induktionsstrom erzeugt. Dieser Induktionsstrom ist so

gerichtet, daß er mit seinem Magnetfeld den Entstehungsvorgang zu hemmen sucht (Lenzsche Regel). Da hier der Entstehungsvorgang die Bewegung des Leiters (Spule) ist, wird sie gebremst. Die bremsende Wirkung ist um so größer, je stärker der Induktionsstrom ist, je niedriger also u. a. der ohmsche Widerstand im Stromkreis ist. Diese Art der Dämpfung wird durch einen Aluminiumrahmen erreicht, auf den die Drehspule gewickelt ist. Da der Rahmen eine kurzgeschlossene Windung darstellt, ist die Dämpfung verhältnismäßig wirkungsvoll und wird als Kurzschlußdämpfung bezeichnet.

Besitzt die Kupferdrahtwicklung der Drehspule einen kleinen Widerstand und wird das Meßwerk in einem niederohmigen Stromkreis betrieben, so übt der in der Wicklung bei Bewegung entstehende Induktionsstrom ebenfalls eine bewegungshemmende Wirkung aus. Diese Eigenschaft kann man sich beim Transport von Drehspulinstrumenten zunutze machen, indem man die Drehspule an den Klemmen kurzschließt. Bei Vielfachinstrumenten erreicht man das weitgehend durch Einschalten des kleinsten Strom- bzw. Spannungsmeßbereichs und Verbinden der Anschlußklemmen durch eine Kurzschlußbrücke. Das durch Transporterschütterungen verursachte Zeigerpendeln wird damit gedämpft.

10.2.1.2. Aufbau des Drehspulmeßwerks

Im homogenen ringförmigen Feld eines Dauermagneten ist eine Spule drehbar gelagert. Das homogene Ringfeld wird durch die besondere Form der Polschuhe und einen zylindrischen Eisenkern erzielt.

Die Drehspule ist meistens auf einen Aluminiumrahmen gewickelt (Dämpfung). An der Spule ist der Zeiger befestigt. Als Gegen- und Rückstellkraft wirken zwei gegenläufig gewickelte Spiralfedern, die oberhalb

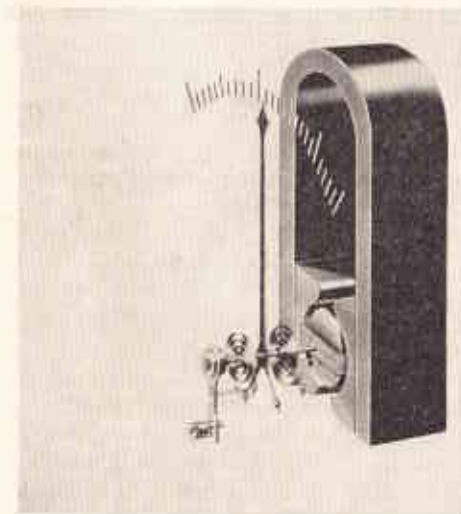


Abb. 10.5 – Drehspulmeßwerk mit Außenmagnet
(Werkbild Hartmann & Braun AG)

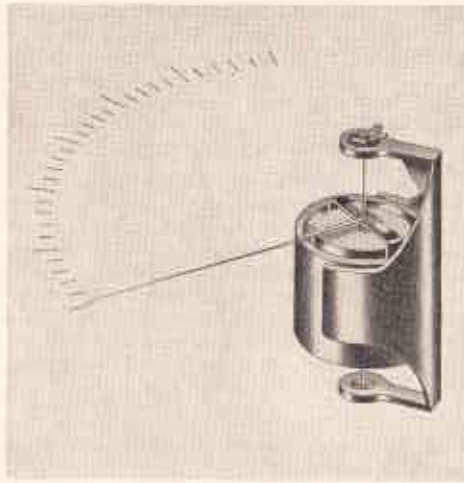


Abb. 10.6 – Drehspulmeßwerk mit Kernmagnet (Spannbandlagerung)
(Werkbild Hartmann & Braun AG)

und unterhalb des Zeigers angebracht sind. Diese Spiralfedern übernehmen als dritte Aufgabe die Stromzuführung zur Drehspule.

Seitdem es gelingt, kleine kräftige Dauermagnete herzustellen, werden Drehspulmeßwerke meistens als sog. Kernmagnetmeßwerke gebaut. Das homogene Ringfeld wird hier durch den als Dauermagneten hergestellten zylindrischen Kern und einen Weicheisenzylinder gebildet, der den Kernmagneten außerhalb der Drehspule umschließt (vgl. hierzu Abb. 10.6).

Um das Gewicht des Zeigers auszugleichen, sind an seinem unteren Ende (unterhalb des Drehpunkts) meistens verschiebbare Gegengewichte angebracht.

10.2.1.3. Eigenschaften des Drehspulmeßwerks

Da die Richtung, in die die Drehspule beim Stromdurchgang bewegt wird, von der Stromrichtung abhängt – Umkehrung der Stromrichtung bedingt die Umkehrung der Bewegungsrichtung –, ist das **Drehspulmeßwerk** nur für Gleichstrommessungen geeignet. Für Wechselstrommessungen sind zusätzliche Schaltelemente wie Trockengleichrichter oder Thermoelemente erforderlich. Eine magnetische Kraftwirkung ist nur dann vorhanden, wenn zwei Magnetfelder aufeinander einwirken. Beim Drehspulmeßwerk wird ein Magnetfeld durch den Dauermagneten gebildet. Der Strom in der Spule braucht daher nur das zweite Magnetfeld aufzubauen. Zudem ist der magnetische Kreis weitgehend durch ferromagnetischen

Werkstoff mit guter Permeabilität ausgefüllt. Aus diesen Gründen sind **Drehspulmeßwerke empfindlicher als alle anderen Meßwerke**. So erreicht man eine Empfindlichkeit bis etwa $1 \mu\text{A}$! **Der Eigenverbrauch an elektrischer Energie ist sehr gering**; er beträgt etwa $0,01 \mu\text{W}$ bis $0,5 \text{ mW}$. Die Dämpfung wird durch den Spulenträger bzw. die Spule selbst erreicht. Damit entfallen zusätzliche Bauelemente zur Dämpfung, die die Masse und damit die Massenträgheit erhöhen würden. **Die Kraft, mit der die Spule ausgelenkt wird, hängt linear von der Stromstärke ab. Deshalb ist auch die Skalenteilung eines Drehspulinstruments linear.**

10.2.1.4. Besondere Bauarten von Drehspulmeßwerken

Um die physikalisch bedingte hohe Empfindlichkeit eines Drehspulmeßwerks voll auszunutzen, liegt es nahe, besondere Konstruktionsmöglichkeiten zur Verminderung der Lagerreibung für die Drehspule anzuwenden. Hierzu gehört die schon eingangs erwähnte Spannbandlagerung der Drehspule. Hierbei fällt die u. U. lagebedingte Reibung der Spitzen- oder Zapfenlagerung fort. Die Spannblätter übernehmen somit folgende Aufgaben:

- Gegenkraft (Torsion),
- Rückstellkraft,
- Lagerung der Drehspule und
- Stromzuführung.

Eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit ist durch die Bandaufhängung möglich. Hier werden zwei sehr dünne Metallbändchen, die isoliert aneinandergeklebt sind, zur Aufhängung der Drehspule benutzt. Da die Spule aber nicht mehr fest gelagert und damit zentriert ist, muß ein solches Meßwerk genau senkrecht aufgestellt werden. Ein Drehspulmeßwerk mit Bandaufhängung wird meistens als sog. **Galvanometer** gebaut. Galvanometer haben eine freitragende Drehspule ohne Aluminiumrähmchen und meistens keine geeichte Skala. Sie dienen z. B. zur Nullanzeige in Meßbrücken. Tragbare Meßinstrumente, die Meßwerke mit Bandaufhängung enthalten, benötigen eine Wasserlibelle und Stellschrauben, um eine genaue Senkrechtheit zu ermöglichen.

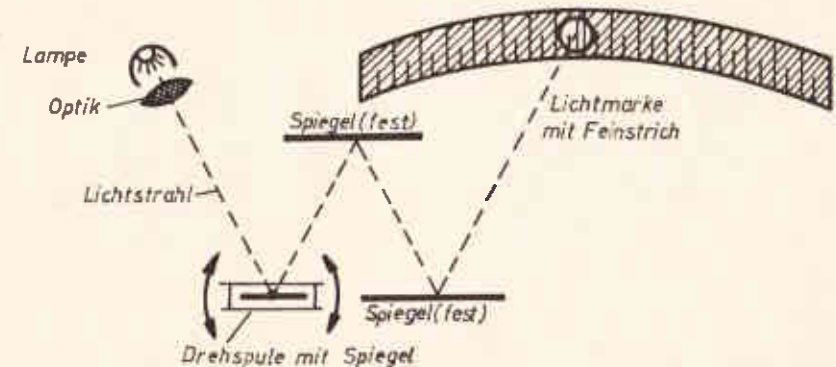


Abb. 10.7 – Schematischer Aufbau eines Lichtzeigermeßwerks

Zur genauen Ablesung von Skalenwerten ist eine große, fein unterteilte Skala wünschenswert. Eine große Skala bedingt aber lange Zeiger. Lange Zeiger sind jedoch schwerer als kurze und besitzen daher auch eine größere Massenträgheit. Dieser Schwierigkeit begegnet man durch den Bau von Lichtzeigermeßwerken. Ein **Drehspul-Lichtzeigermeßwerk** ist im Prinzip wie folgt aufgebaut: Anstelle des Zeigers wird an der Drehspule eines Drehspulmeßwerks ein winzig kleiner Metallspiegel befestigt. Auf diesen Spiegel wird ein scharf gebündelter Lichtstrahl geworfen (Glühlampe und Linsenoptik).

Der vom Drehspiegel reflektierte Lichtstrahl kann nun entweder direkt oder nach mehrfacher Umlenkung durch weitere Spiegel auf eine Skala projiziert werden. Im Gegensatz zu Zeigerinstrumenten mit einer größten Zeigerlänge von etwa 100 mm kann man hier bei geringer Baugröße Zeigerlängen von 300 mm und mehr mit Leichtigkeit erreichen. **Der Lichtzeiger ist masselos! Hochwertige Kabelmeßeinrichtungen enthalten meistens solche Lichtzeigermeßwerke.**

10.2.2. Das elektrodynamische Meßwerk

10.2.2.1. Physikalische Grundlagen zur Arbeitsweise

Grundsätzlich werden zwei Magnetfelder benötigt, damit es zu einer Kraftwirkung kommt. Diese beiden Magnetfelder können durch **zwei stromdurchflossene Spulen** gebildet werden. Ordnet man innerhalb einer feststehenden Spule eine drehbar gelagerte Spule an, so erhält die Drehspule einen Drehantrieb, wenn durch beide Spulen **gleichzeitig** ein Strom fließt. Die Wirkungsweise ist der des Drehspulmeßwerks sehr ähnlich, nur daß hier das feststehende Magnetfeld nicht durch einen Dauermagneten, sondern durch die feststehende Stromspule gebildet wird. Meistens wird die feststehende Spule in den Stromkreis (Reihenschaltung) und die bewegliche Spule parallel zum Meßobjekt geschaltet. Diese Schaltung ergibt sich schon aus dem Aufbau:

Stromspule = dicke Drähte,
Spannungsspule = dünne Drähte.

Nach dem Ohmschen Gesetz fließt beim Anlegen einer Spannung auch durch die bewegliche Spule ein Strom I .

Ändert sich die Stromrichtung in beiden Spulen gleichzeitig, so ändert sich auch die Feldlinienrichtung in beiden Spulen. Die Richtung und Größe der Kraftwirkung bleiben aber erhalten. Daraus folgt, daß ein **dynamisches Meßwerk auch für Wechselstrommessungen** geeignet ist. Das elektrodynamische Meßwerk wird vorwiegend zur **Leistungsmessung** verwendet. Die elektrische Leistung ergibt sich aus folgenden Formeln

- a) Gleichstrom : $P = U \cdot I$
b) Wechselstrom: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$.

Tritt zwischen Wechselspannung und Wechselstrom eine Phasenverschiebung φ auf, so erreichen die Ströme in der festen Stromspule und in der beweglichen Spannungsspule nicht im gleichen Augenblick ihren Höchstwert. Damit wird die magnetische Kraftwirkung kleiner. Im äußersten Fall ändert sich bei 90° Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom die Kraftwirkung periodisch in je gleicher Größe zur

positiven und negativen Drehrichtung. Aufgrund der Massenträgheit bleibt die Drehspule in ihrer Ruhelage – kein Ausschlag. Da der $\cos$ für 90° Null ist, ergibt sich aus der Formel für die Wechselstromleistung: $P = 0$. Das elektrodynamische Meßwerk zeigt also nur die **Wirkleistung** an (vgl. hierzu die Diagramme: Leistungsaufnahme einer Induktivität und einer Kapazität im Abschn. 9.3).

10.2.2.2. Aufbau des elektrodynamischen Meßwerks

Innerhalb einer feststehenden, aus Kupferdraht mit verhältnismäßig großem Querschnitt hergestellten Spule ist eine Spule aus dünnen Drähten drehbar gelagert. Die Drehspule ist – wie üblich – mit einem Zeiger verbunden. Spiralfedern dienen als Gogen- und Rückstellkraft.

Zur Bedämpfung des Zeigerpendels bedient man sich meistens der Luftdämpfung. Neben diesen sogenannten eisenlosen Meßwerken sind auch eisengeschlossene Meßwerke gebräuchlich (vgl. hierzu Abb. 10.9). Der Eisenschluß mit seiner großen Permeabilität bewirkt eine höhere Empfindlichkeit und einen Schutz gegen fremde Fehler. Bei eisengeschlossenen Meßwerken sind jedoch die mit zunehmender Frequenz steigenden Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverluste zu berücksichtigen. Eisengeschlossene elektrodynamische Meßwerke werden fast ausschließlich für Messungen in Wechselstromnetzen mit Frequenzen bis ca. 150 Hz eingesetzt.

10.2.2.3. Eigenschaften des elektrodynamischen Meßwerks

Das Meßwerk zeigt nur dann einen Ausschlag, wenn in beiden Spulen gleichzeitig ein Strom fließt. Es wird daher für Messungen verwendet, bei denen zwei elektrische Größen gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grunde bietet sich das Meßwerk zur Messung der Wirkleistung an

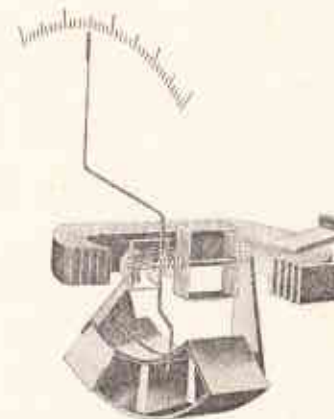


Abb. 10.8 – Elektrodynamisches
Meßwerk (eisenlos)

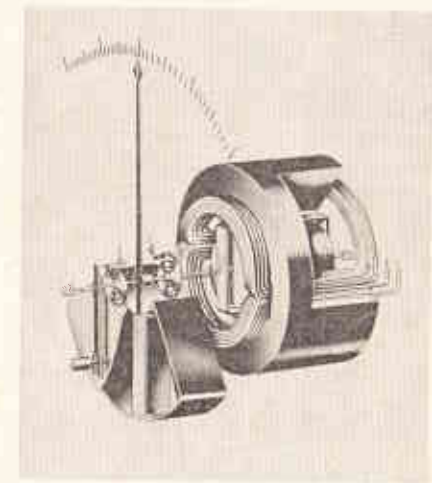


Abb. 10.9 – Elektrodynamisches
Meßwerk (eisengeschlossen)
(Werkbild Hartmann & Braun AG)

(Wattmeter). Eisenlose Meßwerke eignen sich auch für Messungen bei höheren Frequenzen, sind jedoch gegenüber eisengeschlossenen erheblich unempfindlicher.

10.2.3. Dreheisenmeßwerk

10.2.3.1. Physikalische Grundlagen zur Arbeitsweise

Eine stromdurchflossene Spule erzeugt ein Magnetfeld, dessen Feldlinienrichtung von der Stromrichtung abhängt. Die Feldlinienrichtung läßt sich nach der Korkenzieher-Regel oder der Rechten-Hand-Regel für den Nordpol bestimmen. Ein in die Spule eingebrachter Weicheisenkern wird von den magnetischen Feldlinien durchsetzt und auf diese Weise selbst magnetisiert. Diese Erscheinung ist unter dem Begriff **magnetische Influenz** bekannt. Ordnet man in der stromdurchflossenen Spule zwei Weicheisenkerne parallel an, von denen der eine fest, der andere beweglich ist, so werden beide Kerne infolge der magnetischen Influenz in gleicher Richtung magnetisiert. Damit stehen sich an den **parallelliegenden Enden der Weicheisenkerne jeweils gleichnamige Magnetpole gegenüber**. Da sich gleichnamige Magnetpole abstoßen, werden die Eisenkerne auseinandergedrängt.

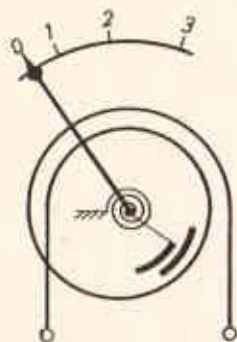


Abb. 10.10 – Schema eines Dreheisenmeßwerks

Die Kraft, die zwischen den Weicheisenkernen wirkt, hängt nicht linear von der Stromstärke in der Spule ab. Verdoppelt man beispielsweise die Stromstärke in der Spule, so verdoppelt sich die Stärke des Spulenmagnetfelds. Infolge Influenz verdoppelt sich aber auch die Stärke des Magnetfelds in jedem der beiden Eisenkerne. Damit wird die Kraftwirkung viermal so groß. Man kann also sagen, daß die Kraft, mit der die Weicheisenkerne aus der Ruhelage abgestoßen werden, vom Quadrat der Stromstärke abhängt: $F \sim I^2$.

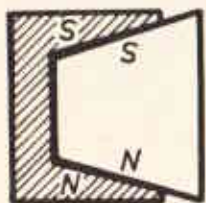


Abb. 10.11 – Maßnahme zur Linearisierung der Skalenteilung beim Dreheisenmeßwerk

Die Skala eines Dreheisenmeßwerks müßte daher eine **quadratische Teilung** erhalten. Diesen Nachteil kann man zum Teil dadurch beheben, daß man den Weicheisenkernen eine besondere Form gibt. Die magnetische Kraftwirkung hängt nämlich auch von der wirksamen Polfläche und von der Luftspaltlänge ab. Formt man den beweglichen Eisenkern trapezförmig aus, so wird bei Abstoßung die wirksame Polfläche zwischen den beiden Kernen zunehmend kleiner. Auf diese Weise wird das quadratische Ansteigen der Kraftwirkung größtenteils ausgeglichen.

Die Kraftwirkung (Abstoßung) ist nicht von der Stromrichtung in der Spule abhängig. Ändert sich die Stromrichtung in der Spule, so ändert sich zwangsläufig auch die Richtung des Influenzfeldes in beiden Weicheisenkernen. So stehen sich wiederum gleichnamige Magnetpole gegenüber. Die Krafttrichtung ist die gleiche geblieben. Aus diesem Grunde sind Dreheisenmeßwerke grundsätzlich auch für Wechselstrommessungen geeignet.

10.2.3.2. Aufbau des Dreheisenmeßwerks

Innerhalb einer Kupferdrahtspule ist ein Weicheisenstück fest angebracht. In geringem Abstand dazu befindet sich das mit einem Zeiger verbundene bewegliche Weicheisenstück. Eine im Zeigerdrehpunkt montierte Spiralfeder übernimmt die Aufgabe der Gegen- und Rückstellkraft. Da die Stromspule feststeht, entfallen besondere Stromzuführungen zum beweglichen Teil des Meßwerks.

Beim Dreheisenmeßwerk ist eine Kurzschlußdämpfung zur Verminderung des Zeigerpendelns nicht ohne weiteres anwendbar. Hier wird fast ausschließlich die Luftdämpfung angewendet (auch Luftkammerdämpfung genannt).

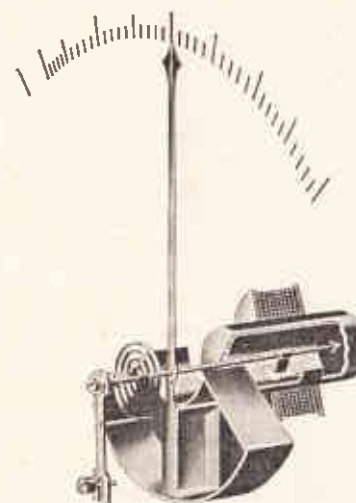


Abb. 10.12 – Dreheisenmeßwerk

Bei der **Luftdämpfung** kann sich ein am unteren Ende des Zeigers befestigter Aluminiumflügel in einer geschlossenen Kammer bewegen. Der Flügel wird so bemessen, daß er sich gerade eben – ohne mit den Kammerwänden in Berührung zu kommen – frei bewegen kann (vgl. hierzu Abb. 10.12).

Bei einem Zeigeranschlag wird durch die Bewegung des Aluminiumflügels die Luft im linken Teil der Luftkammer verdichtet und kann nur langsam an den Rändern des Flügels entweichen. Dadurch kommt es zur Abbremsung der Zeigerbewegung und vor allem des Zeigerpendelns.

10.2.3.3. Eigenschaften des Dreheisenmeßwerks

Da die Krafttrichtung nicht von der Stromrichtung in der Spule abhängt, ist das Dreheisenmeßwerk für Wechselstrommessungen geeignet. Mit zunehmender Frequenz erhöhen sich aber der induktive Blindwiderstand der Spule und die Wirbelstromverluste in den Weicheisenkernen.

Dadurch sind der Meßgenauigkeit bei Wechselströmen höherer Frequenz absolute Grenzen gesetzt. Die gebräuchlichen Dreheisenmeßwerke sind für Wechselstromfrequenzen bis etwa 150 Hz ausreichend genau. Der Nachteil einer an sich notwendigen quadratischen Skalenteilung wird durch die Form der Weicheisenkerne weitgehend behoben. Allerdings muß damit ein Verlust an Empfindlichkeit in Kauf genommen werden. Abb. 10.13 zeigt die Skala eines solchen Meßwerks.

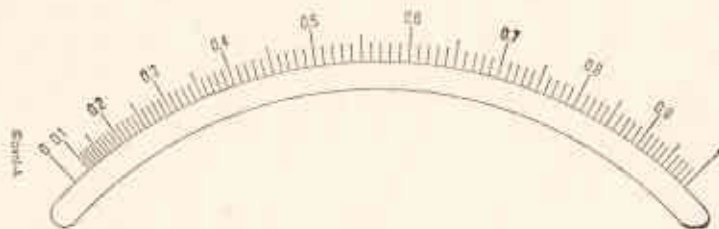


Abb. 10.13 – Skala eines Dreheisenmeßwerks

Beim Dreheisenmeßwerk müssen durch den Spulenstrom beide für eine Kraftwirkung erforderlichen Magnetfelder erzeugt werden. Hinzu kommt, daß der magnetische Kreis überwiegend durch Luft verläuft (schlechte Permeabilität). Dadurch ist die **gegenüber dem Drehspulmeßwerk erheblich geringere Empfindlichkeit** bedingt. Bei Dreheisenmeßwerken erreicht man eine Empfindlichkeit von etwa 1 mA (vgl. Drehspulmeßwerk: 1 μ A!). Aus vorgenannten Gründen ist ebenfalls der Eigenverbrauch an elektrischer Energie erheblich größer als beim Drehspulmeßwerk. Er liegt etwa zwischen 0,1 W und einigen W (vgl. Drehspulmeßwerk: 0,01 μ W bis 0,5 mW!).

Liegt ein Dreheisenmeßwerk im Streufeldbereich eines fremden Magnetfelds, so werden die Weicheisenkerne dadurch magnetisiert. Die Anzeige wird ungenau!

Da die Spule beim Dreheisenmeßwerk feststeht, kann sie im Hinblick auf den Drahtquerschnitt und die mechanische Festigkeit besonders stabil gebaut werden. Das ergibt eine **große Sicherheit gegen Überbelastung**. Zudem entfällt die Notwendigkeit für bewegliche Stromzuführungen.

Die für Drehspulmeßwerke übliche Meßbereichserweiterung für Strommessungen durch Parallelschalten von Nebenwiderständen (sog. shunts) ist bei Dreheisenmeßwerken nicht anwendbar. Durch das Parallelschalten eines ohmschen Widerstands mit der Feldspule (R und X_L) ergibt sich eine stark frequenzabhängige Stromverzweigung. Bei Dreheisenmeßwerken werden daher zur Änderung des Strommeßbereichs Spulenabgriffe an der Feldspule umgeschaltet: für kleine Ströme liegen die Abgriffe in Rei-

henschaltung, für große Ströme werden die Spulenabgriffe parallelgeschaltet.

Das Meßwerksymbol für das Dreheisenmeßwerk ist auf den Vorläufer des heutigen Meßwerktyps zurückzuführen. Bei diesem – einem der ältesten elektrischen Meßwerke – wurde ein an einer Zugfeder befestigter Weicheisenkern je nach Stromstärke mehr oder weniger stark in eine Spule hineingezogen. Ein mit dem Eisenkern verbundener Zeiger, der sich über einer Skala bewegen konnte, diente zur Anzeige der Meßgröße.

10.2.4. Vibrationsmeßwerk (Zungenfrequenzmesser)

10.2.4.1. Physikalische Grundlagen zur Arbeitsweise

Befindet sich vor der Polfläche eines Elektromagneten ein ferromagnetischer Stoff – z. B. in Form einer Stahlzunge –, so wird er infolge der magnetischen Influenz selbst magnetisiert.

Damit stehen sich ungleichnamige Magnetpole gegenüber – die Stahlzunge wird angezogen. Kehrt man die Stromrichtung um, dann bleibt die Kraftrichtung (Anziehung) erhalten.

Fließt durch den Elektromagneten ein Wechselstrom, so wird die Stahlzunge sowohl während der positiven als auch während der negativen Halbwelle des Wechselstroms angezogen und jeweils beim Nulldurchgang wieder losgelassen. **Die Zunge schwingt demnach mit der doppelten Frequenz des Wechselstroms.** Sie wird aber nur mit der Frequenz bevorzugt – also besonders kräftig – schwingen, die ihrer **Eigenschwingungszahl** entspricht (**Resonanz**). Die Eigenschwingungszahl hängt außer vom Material von den Abmessungen der Zunge ab. So ist es mit einfachen Mitteln möglich, eine ganze Reihe herzustellen, bei der die Eigenschwingungszahl von Zungo zu Zunge um einen bestimmten Betrag steigt.

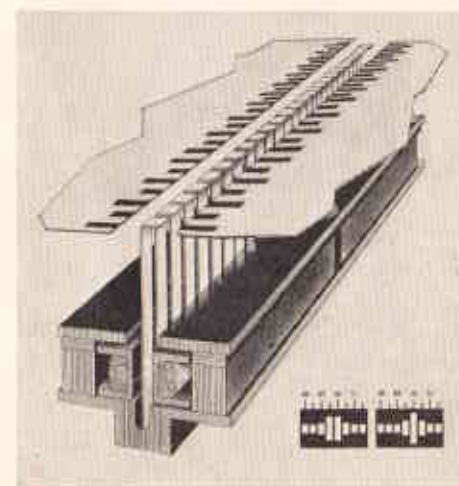


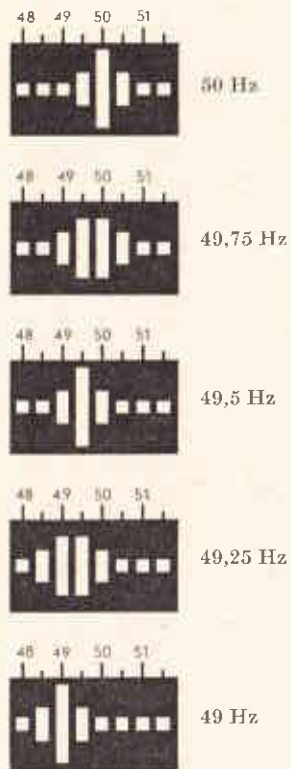
Abb. 10.14 – Vibrationsmeßwerk

Ordnet man eine solche Stahlzungenreihe vor den entsprechend langen Polschuhen eines Elektromagneten an und legt eine Wechselspannung an, so wird nur jeweils die Zunge deutlich sichtbar schwingen, deren Eigenschwingungszahl der Frequenz der Wechselspannung entspricht (bei einer Frequenz von 50 Hz muß die Stahlzunge beispielsweise eine Eigenschwingungszahl von 100 Hz haben). Da die Nachbarzungen nur geringfügig gegen die Wechselspannungsfrequenz verstimmt sind, werden sie etwas mitschwingen.

10.2.4.2. Aufbau eines Vibrationsmeßwerks

Vor den Polschuhen eines Elektromagneten ist eine Reihe geringfügig gegeneinander verstimmter Stahlzungen eingespannt. Um das Schwingen einer Stahlzunge besser beobachten zu können, ist sie am oberen Ende abgewinkelt und trägt eine weiße Markierung. Die Zungen können innerhalb einer ausgeschnittenen und auf die Frequenz geeichten Skala frei schwingen (vgl. hierzu Abb. 10.14).

10.2.4.3. Eigenschaften des Vibrationsmeßwerks



(Werkbild
Hartmann & Braun AG)

Abb. 10.15 – Ablesung der Frequenz an der Skala eines Zungenfrequenzmessers

Vibrationsmeßwerke werden ausschließlich zur Frequenzmessung benutzt. Sie besitzen eine hohe, stets gleichbleibende Meßgenauigkeit und sind sehr robust gebaut. Die Meßbereiche für Frequenzen liegen etwa zwischen 6 und 1500 Hz. Mit besonderen Hilfsmitteln (Überlagerungsverfahren) ist es möglich, Frequenzen bis zu 1 Hz zu messen. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa 0,25%. Nebenstehende Bilder erläutern die Ablesung eines Zungenfrequenzmessers.

In der Fernmeldetechnik wurden bisher Vibrationsmeßwerke eingesetzt, um die Unterbrechungsfrequenz der Nummernschalter in Fernsprechapparaten zu messen. Da aber Vibrationsmeßwerke keinerlei Rückschluß über das Impulsverhältnis zulassen, sind sie durch andere Meßeinrichtungen ersetzt worden.

Das Hauptanwendungsgebiet der Vibrationsmeßwerke liegt in der Messung der Frequenz technischer Wechselströme (z. B. 50 Hz, $16\frac{2}{3}$ Hz usw.).

10.2.5. Das elektrostatische Meßwerk

10.2.5.1. Physikalische Grundlagen zur Arbeitsweise

Stehen sich zwei großflächige Körper gegenüber, die an einer elektrischen Spannung liegen, so üben sie aufeinander eine anziehende Kraft aus (ungleichnamige elektrische Ladungen ziehen sich an). Die Kraft ist nicht besonders groß und hängt u. a. vom Quadrat der elektrischen Feldstärke E und der wirksamen Fläche A ab:

$$F \sim E^2 \cdot A.$$

Daraus ergibt sich, daß auch die Skalenteilung eines elektrostatischen Meßwerks nicht linear sein kann. Ordnet man eine Fläche fest, die andere beweglich an, so ist die Kraft, mit der die unter Spannung stehenden Flächen angezogen werden, ein Maß für die angelegte Spannung. Nach Umpolung der Spannung stehen sich wiederum verschiedene Ladungen gegenüber. Die Richtung der Kraft ist also nicht von der Richtung der zu messenden Spannung abhängig. Ein elektrostatisches Meßwerk ist daher für die Messung von Wechselspannungen geeignet.

Die Anordnung zweier voneinander isolierter, leitender Beläge entspricht dem Aufbau eines Kondensators. Über einen Kondensator fließt aber nur ein Strom, wenn sich die angelegte Spannung verändert (Verschiebungsstrom / dielektrische Verschiebung). Das ist der Fall, wenn eine Gleichspannung angeschaltet wird oder wenn eine Wechselspannung anliegt. Der Eigenverbrauch ist äußerst gering.

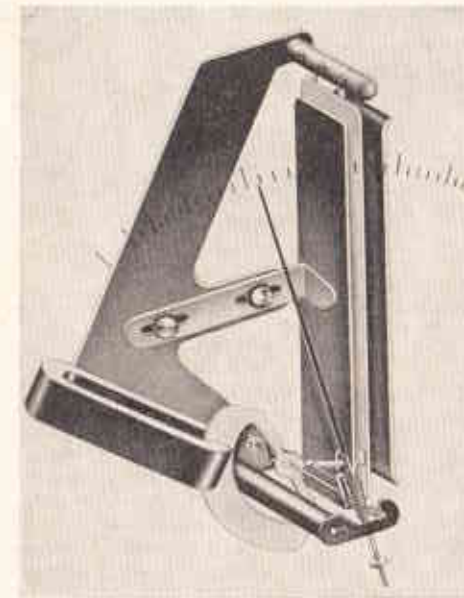


Abb. 10.16 – Elektrostatisches Meßwerk

(Werkbild Hartmann & Braun AG)

Da bei Anliegen einer Gleichspannung über das Meßwerk kein Strom, bei Anliegen einer Wechselspannung ein stark von der Frequenz abhängiger Strom fließt, ist eine Meßbereichserweiterung durch Vorschalten von Widerständen nicht möglich. Wenn nämlich z. B. kein Strom fließt, dann tritt an einem Vorwiderstand auch kein Spannungsabfall auf.

10.2.5.2. Aufbau des elektrostatischen Meßwerks

Zwischen zwei feststehenden Metallplatten ist eine bewegliche Metallplatte aufgehängt. Die bewegliche Platte ist mit einer der feststehenden Platten leitend verbunden.

Wird an die feststehenden Platten eine Spannung gelegt, so tritt eine doppelte Kraftwirkung auf: Auf der linken Seite stoßen sich gleichnamige elektrische Ladungen ab – die linke und die bewegliche Platte sind ja leitend verbunden –, auf der rechten Seite ziehen sich ungleichnamige Ladungen an. Die bewegliche Platte wird nach rechts gezogen und ein mit ihr über eine Zwischenstange verbundener Zeiger gibt mit seinem Ausschlag die Meßgröße an. Als Gegen- und Rückstellkraft kann hier das Gewicht der beweglichen Platte dienen. Zur Dämpfung des Zeigerpendelns bedient man sich beim elektrostatischen Meßwerk neben der Luftdämpfung einer Wirbelstromdämpfung.

Bei der **Wirbelstromdämpfung** kann sich eine mit dem Zeiger verbundene Aluminium- oder Kupferscheibe zwischen den Polen eines Dauermagneten frei bewegen.

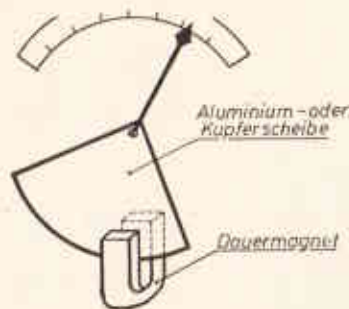


Abb. 10.17 – Wirbelstromdämpfung

Eine Bewegung der Metallscheibe zwischen den Magnetpolen hat die Entstehung von Induktionsströmen zur Folge (Änderung des magn. Flusses um den Leiter). In der großflächigen Metallscheibe können sich diese Induktionsströme frei bewegen und ausgleichen; man spricht von Wirbelströmen. Nach der Lenzschen Regel sind aber Induktionsströme stets so gerichtet, daß sie mit ihrem Magnetfeld den Entstehungsvorgang hemmen. Die Bewegung der Metallscheibe – und damit auch die des Zeigers – wird gebremst.

10.2.5.3. Eigenschaften des elektrostatischen Meßwerks

Elektrostatische Meßwerke sind für **Gleich- und Wechselspannungsmessungen** gut geeignet. Die obere Frequenzgrenze liegt bei etwa 10^7 Hz! Da die elektrostatische Kraftwirkung verhältnismäßig gering ist, ist das Meßwerk ziemlich unempfindlich und wird vorwiegend für die Messung von Spannungen von etwa 20...500 V eingesetzt. Der wesentliche Vorteil des elektrostatischen Meßwerks gegenüber anderen Meßwerken liegt im hohen Innenwiderstand begründet. Sein Innenwiderstand ist bei reiner Gleichspannung praktisch unendlich groß. Bei Wechselspannung hängt er von der Kapazität des Meßwerks und der Frequenz ab.

$$\left(X_C = \frac{1}{\omega C} \right)$$

Weil mit dem Ansteigen der angelegten Spannung der Plattenabstand geringer wird, wächst mit höheren Spannungen die Gefahr eines Durchschlags. Der mögliche Spannungsmessbereich ist daher auch nach oben hin verhältnismäßig stark begrenzt (ca. 500 V).

Neben dem hier beschriebenen Typ eines elektrostatischen Meßwerks gibt es noch andere, wie z. B. das Multizellar und das Quadrantenmeßwerk. Da solche Meßwerke seltener gebraucht werden, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet.

10.2.6. Thermische Meßwerke

Meßwerke, deren Funktion auf der Wärmewirkung des elektrischen Stroms beruhen, sind heute nur noch so wenig im Gebrauch, daß hier nur kurz darauf eingegangen werden soll. Die Arbeitsweise dieser Meßwerke ist auf die **Wärmeausdehnung von Metallen** zurückzuführen.



Abb. 10.18 – Hitzdrahtmeßwerk

Fließt ein Strom durch einen Leiter, so wird in ihm aufgrund seines Widerstands elektrische Energie verbraucht und in Wärmeenergie umgesetzt ($P = I^2 \cdot R$). Im einfachsten Fall wird beim Hitzdrahtmeßwerk die durch Stromwärme bewirkte Längenausdehnung eines Drahts auf einen Zeiger übertragen. In Abb. 10.18 ist dieser Draht waagerecht gespannt.

Bei einer anderen Ausführung, dem Bimetallmeßwerk, wird die unterschiedliche Wärmedehnung zweier verschiedener, aufeinandergeschweißter Metallstreifen (Bimetall) ausgenutzt. Durch Stromwärme dehnt sich das eine Metall stärker als das andere. Der Bimetallstreifen wird verbogen und ein damit verbundener Zeiger bewegt.

Die Stromwärme ist nicht von der Stromrichtung abhängig. Darum sind thermische Meßwerke auch für **Wechselstrommessungen** bis zu hohen Frequenzen geeignet (Antennenstrommessung bei Funkse Sendern). Sie müssen jedoch wegen der Abhängigkeit $P = I^2 \cdot R$ eine quadratische

Skalenteilung erhalten. Thermische Meßwerke sind verhältnismäßig unempfindlich und eignen sich nicht zur Messung geringer Stromstärken.

10.2.7. Eigenschaften der Meßwerke (Zahlenangaben = Mittelwerte)

Meßwerk	Symbol	Meßgröße	Meßbereich (Vollausschlag)	Eigenverbrauch	Frequenzbereich	wichtigste Eigenschaften
Drehpul-		$U \sim$	10 mV ... 10 kV	0,01 ... 0,5 mW		Sehr empfindlich, empfindlich gegen Überlastung, ggf. Überspannungsschutz durch DIAC ¹⁾ , nur für —
Drehpul- mit Gleichrichter		$I \sim$	1 μ A ... 10 kA			
Drehpul- mit Thermo- umformer		$U \sim$ $I \sim$	100 mV ... einige kV*) 100 μ A ... einige 100 A*)	0,1 mW ... 0,25 W	15 ... 10 000 Hz (ger. bis 20 000 Hz)	Empfindlich, überlastungsempfindlich, auch für $\sim$ bis 10 000 Hz, ggf. bis 20 000 Hz
Drehisen-		$I \sim$	0,1 ... 10 A	0,01 ... 1 W	bis 100 MHz	Wegen des Thermoelementes geringe Empfindlichkeit, auch für Strommeßzweige, aber für $\sim$ hoher Frequenz.
elektro- dynamisch		$U \approx$ $I \approx$	1 V ... einige kV*) 1 mA ... einige 100 A*)	0,1 ... 5 W	bis 150 Hz bis 400 Hz	Nicht sehr empfindlich, verhältnismäßig hoher Eigenverbrauch, unempfindlich gegen Überlastung, robust, für — und $\sim$ Strom und Spannung
elektro- statisch		$P \approx$ bzw. $Q \approx$	3 V/3 mA ... 600 V/10 A*)	0,1 ... 5 W	bis ca. 1000 Hz	Eisenlos: unempfindlich, aber für $\sim$ bis ca. 1000 Hz. Eisen- geschlossen: empfindlicher, aber bei $\sim$ nur bis ca. 150 Hz
Bimetall- bzw. Hitzdraht-		$U \approx$ $I \approx$	20 ... 500 V 0,5 ... 5 A	ca. 0,5 m var ca. 1 ... 5 W	bis ca. 50 MHz bis ca. 10 MHz	Praktisch kein Eigenverbrauch, vorempfindlich, nur für Spannung, bei $\sim$ bis ca. 50 MHz, sehr empfindlich gegen Überspannung (Durchschlag). Nur noch selten gebräuchlich, einfacher mechanisch robuster Aufbau, hoher Eigenverbrauch, Hitzdraht-überlastungsempfindlich, nur für Strom, $\sim$ bis ca. 10 MHz

*) größerer Meßbereich über Meßwandler

10.3. Meßinstrumente

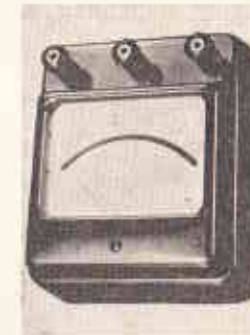
10.3.1. Einfache Meßinstrumente

Wie schon erläutert, besteht ein Meßinstrument aus dem Gehäuse (heute meistens Kunststoff) und dem eingebauten Meßwerk einschließlich Zubehör. Im einfachsten Fall werden Meßinstrumente als

Spannungsmesser (Voltmeter),
Strommesser (Ampereometer),
Widerstandsmesser (Ohmmeter) oder
Leistungsmesser (Wattmeter)



Spannungsmesser
(umschaltbare Bereiche)



Strommesser
(umsteckbare Bereiche)



Leistungsmesser
(mit Spannungs- und Strompfad)

Abb. 10.19 – Einfache Meßinstrumente

hergestellt und haben vielfach nur einen Meßbereich. Daneben gibt es eine Vielzahl von Meßinstrumenten zur Messung der Temperatur, der Kapazität, der Frequenz, der Lichtstärke usw. Die für den betreffenden Meßbereich erforderlichen Vor- oder Nebenzustände sowie Gleichrichter oder Thermoumformer sind normalerweise fest in das Instrument eingebaut und von außen nicht zugänglich. In Abb. 10.19 sind einige Meßinstrumente dargestellt.

Für einige Meßinstrumente werden vom Hersteller entsprechende Vor- oder Nebenzustände als Zubehör angeboten. Die Widerstände sind in Kunststoffgehäuse eingebaut und werden zur Meßbereichserweiterung entweder über Klemmschleife mit dem Instrument verschraubt oder in Steckvorrichtungen (Anschlußbuchsen) des Instruments eingeschoben. Bei der Anwendung solcher Instrumente mit Zusatz-



widerständen ist vor allem auf eine sichere Kontaktgabe zwischen Zusatzwiderstand und Instrument zu achten. Die Meßschnüre werden meistens direkt mit den Zusatzwiderständen verbunden. Meßinstrumente werden tragbar oder zum Einbau in Schalttafeln oder Geräte hergestellt.

Abb. 10.20 – Strom-Spannungsmesser
(mit anklammerbaren
Zusatzwiderständen)

10.3.2. Vielfachinstrumente

Sehr viel größer als für einfache Meßinstrumente mit nur ein oder zwei Meßbereichen ist der Anwendungsbereich der Vielfachinstrumente. Sie sind allerdings auch teuer und bedürfen sorgfältiger Handhabung. Eine der häufigsten Arten von Vielfach-



(Werkbild Metrawatt)



(Werkbild Hartmann & Braun AG)

Abb. 10.21 – Vielfachinstrumente

instrumenten ist die Gruppe der kombinierten Strom-Spannungs-Meßinstrumente mit mehreren Meßbereichen für Strom und Spannung. Daneben gibt es Kombinationen, die für Gleich- und Wechselstrommessungen geeignet sind. Häufig werden sie auch mit zusätzlichen Widerstandsmessbereichen hergestellt. Bei der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten für Vielfachinstrumente ist es praktisch unmöglich, sämtliche Arten in diesem Handbuch aufzuzeigen. Wir wollen uns daher darauf beschränken, Aufbau und Wirkungsweise von Vielfachinstrumenten anhand eines Volt-Amperemeters zu erläutern.

Die Änderung des Spannungs- oder Strommeßbereichs wird bei Vielfachinstrumenten meistens durch einen Stufenschalter, seltener durch Umstecken der Meßschnüre in entsprechend gekennzeichnete Buchsen vorgenommen. Das Meßwerk, die Vor- und Nebenwiderstände und der Meßbe-

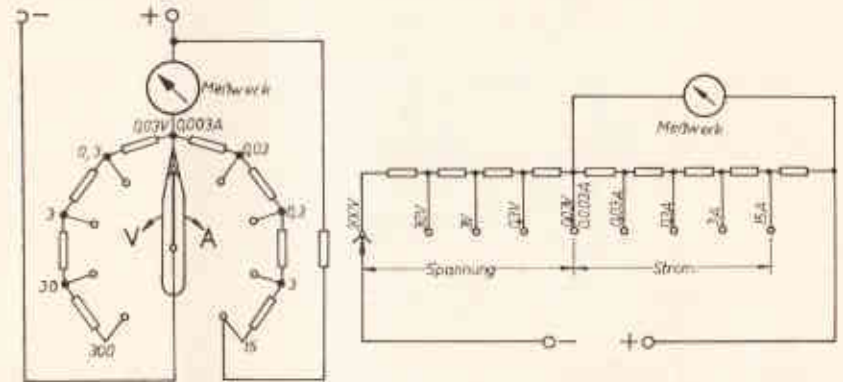


Abb. 10.22 – Schematischer Aufbau und Schaltung eines Vielfachinstruments für Spannungs- und Strommessungen

reichsschalter sind in einem stabilen Kunststoffgehäuse untergebracht. Es sind häufig nur zwei Anschlußklemmen vorhanden. Die Meßbereichserweiterung beim Umschalten bewirkt im Spannungsbereich jeweils das Zuschalten eines weiteren Vorwiderstands, wobei der oder die Vorwiderstände des niedrigeren Meßbereichs mit einbezogen werden. Im Strombereich wird der Meßbereich nicht – wie in einfachen Schaltungen üblich – durch Parallelschaltung von Nebenwiderständen erweitert, sondern mit Hilfe des Stufenschalters der Abgriff an einer Spannungsteilerschaltung geändert. Diese Schaltungsart hat den Vorteil, daß die Umschaltung sowohl im Spannungs- als auch im Strombereich unterbrechungsfrei vor sich geht. Die Berechnung von Vor- und Nebenwiderständen für Meßwerke wird in den Abschnitten 10.3.7.1 und 10.3.7.2 noch besonders erläutert.

Für die Fernsprechentstörung bei der Deutschen Bundespost ist ein besonderes Vielfachinstrument entwickelt worden, das den speziellen Anforderungen der Fernsprechentstörung gerecht wird. Es ermöglicht die Mes-

sung von Gleichspannungen und -strömen, Wechselspannungen, Widerständen und Isolationswiderständen und die grobe Bestimmung von Kapazitätswerten. Die Meßbereiche sind eigens auf die in der Fernsprechtechnik vorkommenden Größen abgestimmt. In Abb. 10.24 ist die Frontplatte des VmFeE wiedergegeben.



Abb. 10.23 – Vielfachmeßinstrument für die Fernsprechentstörung (VmFeE)
(Werkfoto Gossen)

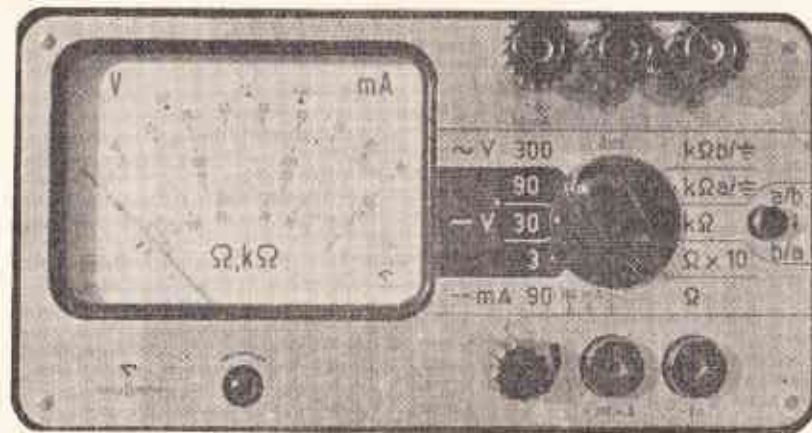


Abb. 10.24 – Frontplatte des VmFeE

10.3.3. Meßinstrumente für Wechselstrom- und -spannungsmessungen

Aufgrund der physikalisch bedingten Eigenarten der verschiedenen Meßwerke sind diese z. B. nicht für Messungen in oder an Wechselstromkreisen geeignet. Zudem ist bei Meßwerken, die für Wechselstrommessungen geeignet sind, der Frequenzbereich für genaue Messungen verhältnismäßig eng begrenzt (vgl.: Drehspulmeßwerk für Wechselströme und -spannungen bis 150 Hz). Da in der Fernmeldetechnik sehr häufig Wechselspannungen oder -ströme mit verhältnismäßig hoher Frequenz gemessen werden müssen, ist die Eignung der üblichen Meßwerke dafür nur durch zusätzliche Bauelemente zu erreichen.

10.3.3.1. Meßgleichrichter

Drehspulmeßwerke sind grundsätzlich nur für Gleichstrom- oder -spannungsmessungen geeignet. Wegen ihrer hohen Empfindlichkeit ist aber ihre Verwendung für Wechselstrom und -spannungen wünschenswert. Zu diesem Zweck schaltet man Gleichrichter vor Drehspulmeßwerke. Von den heute gebräuchlichen Halbleiter-Gleichrichterarten Kupferoxydul-, Germanium-, Selen- und Siliziumgleichrichter sind für meßtechnische Zwecke nur Kupferoxydul- und Germaniumgleichrichter geeignet. Das hängt mit der für diese beiden Arten verhältnismäßig geringen Diffusionspannung (ca. 0,1 ... 0,2 V) zusammen. Da über einen Halbleiter-Gleichrichter in Durchlaßrichtung erst ein Strom fließt, wenn die angelegte Durchlaßspannung gleich oder größer als die Diffusionspannung ist, können auch mit Meßinstrumenten mit Gleichrichtern nur Spannungen gemessen werden, die größer als die Diffusionspannung sind. Die Skaleneinteilung solcher Meßinstrumente ist aus diesem Grunde am Anfang etwas enger.

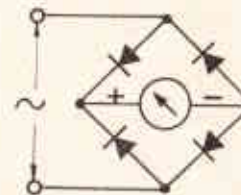


Abb. 10.25 – Meßwerk mit Gleichrichter

Um beide Halbwellen des Wechselstroms zur Messung auszunutzen, werden Meßgleichrichter häufig in Graetzschaltung (Brückenschaltung) angeordnet. Der Meßgleichrichter wird grundsätzlich unmittelbar an das Meßwerk geschaltet, wie es Abb. 10.25 zeigt. Die Skalen von Drehspulinstrumenten mit Meßgleichrichter werden mit sinusförmigem Wechselstrom (bzw. -spannung) geeicht. Grobe Meßfehler treten jedoch erst bei stärkerer Abweichung von der Sinusform auf. In modernen Meßinstrumenten findet man auch andere Gleichrichterschaltungen, die nach dem Einwegprinzip arbeiten.

Geringe Unsymmetrien in einer Brückenschaltung können bei empfindlichen Instrumenten nämlich bereits zu groben Meßfehlern führen. Drehspulmeßinstrumente mit eingebautem Gleichrichter sind für Strom- und Spannungsmessungen im Frequenzbereich von 15 ... 10000 Hz geeignet. Oberhalb dieser Frequenz wirken sich die Induktivität der Drehspule und die Kapazität des Meßgleichrichters nachteilig aus. Einige moderne Instrumente lassen auch genaue Messungen bis zu 20000 Hz zu.

10.3.3.2. Thermoumformer

Sollen Wechselströme höherer Frequenz (über 10000 Hz) gemessen werden, so kann man dafür Thermoumformer verwenden. Die Wirkungsweise eines Thermoumformers beruht auf der Tatsache, daß bei einer Erwärmung der Verbindungsstelle zweier verschiedener Metalle zwischen deren Enden eine Spannung – die sog. Thermospannung – entsteht. Die Höhe dieser Spannung ist dabei abhängig von dem Temperaturunterschied zwischen Verbindungsstelle und Drahtende und der Art der verwendeten verschiedenen Metalle. Die einfachste Anordnung bezeichnet man als Thermoelement.

Die Eigenschaften einiger gebräuchlicher Thermoelemente sind in folgender Tabelle zusammengestellt. Die angegebenen Spannungen gelten für einen Temperaturunterschied $\Delta\theta$ von 100°C .

Aufbau	Spannung bei $\Delta\theta = 100^\circ\text{C}$	Grenztemperatur
Kupfer-Konstantan	4,25 mV	400°C
Eisen-Konstantan	5,37 mV	600°C
Chromnickel-Nickel	4,04 mV	900°C

Da zur Erzeugung einer Thermospannung Wärmeenergie benötigt wird, ist mit Thermoelementen bzw. Thermoumformern keine leistungslose Messung möglich. Bei der Anwendung von Thermoumformern für elektrische Messungen ist daher nur eine Strommessung möglich. Ein Thermoumformer besteht im Prinzip aus einem kurzen Heizdraht, der vom Meßstrom durchflossen wird. An diesen Heizdraht ist ein Thermoelement angeschweißt, das mit dem Meßwerk verbunden ist.

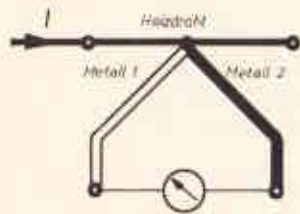


Abb. 10.26 – Thermoumformer

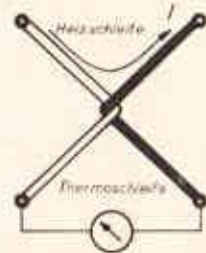


Abb. 10.27 – Thermokreuz

Die Thermoumformer können auch als sog. Thermokreuze hergestellt werden, bei denen die beiden verschiedenen Metalldrähte ineinander verhakt werden. Dabei wird dann eine Schleife als Heizschleife (stromdurchflossen) und die andere Schleife als Meß- oder Thermoschleife (Abgriff der entstehenden Thermospannung) benutzt. Fließt durch den Heizdraht bzw. die Heizschleife ein Strom, so tritt infolge des Leistungsverlusts $P = I^2 \cdot R$ eine Erwärmung ein. Damit entsteht eine Thermospannung, die einen Thermostrom über das Meßwerk zur Folge hat. Aus der Beziehung $P = I^2 \cdot R$ ergibt sich eindeutig, daß die Skala eines Meßinstruments mit eingebautem Thermoumformer quadratisch geteilt sein muß (am Anfang enge, am Ende weite Teilung).

Da der kurze Heizdraht praktisch keine Induktivität und keine Kapazität aufweist, ist mit Meßinstrumenten mit eingebautem Thermoumformer eine Wechselstrommessung bis zu einer Frequenz von etwa 100 MHz möglich (darüber hinaus wirkt sich der Skin-Effekt nachteilig aus).

10.3.4. Meßtechnische Eigenschaften von Meßinstrumenten

10.3.4.1. Meßgröße und Meßbereich

Zur Durchführung von elektrischen Messungen ist zunächst einmal wichtig, das für die betreffende Meßgröße (z. B. Spannung, Strom oder Widerstand) geeignete Meßinstrument oder -gerät zu wählen. Wichtig ist dabei

die Feststellung, ob es sich beispielsweise um reinen Gleichstrom, reinen sinusförmigen Wechselstrom oder wechselstromüberlagerten Gleichstrom handelt. Damit die Beschädigung eines Meßinstruments vermieden wird, muß auch der zu erwartende Zeigerausgang innerhalb des Meßbereichs liegen. Im Zweifelsfall lieber einen zu großen Meßbereich wählen!

10.3.4.2. Innenwiderstand und Eigenverbrauch

Wie wir noch im Abschn. 10.4 „Messung elektrotechnischer Grundgrößen“ erkennen werden, ist die Beachtung des Innenwiderstands für die Genauigkeit der Messung oftmals von ausschlaggebender Bedeutung. Bei Spannungsmessern läßt sich der Eigenverbrauch durch die Stromstärke kennzeichnen, die zum Vollausschlag des Zeigers erforderlich ist. Für andere Meßinstrumente wird die zum Vollausschlag benötigte elektrische Leistung als Eigenverbrauch angegeben. Sie liegt je nach verwendetem Meßwerk etwa zwischen $0,01 \mu\text{W}$ und einigen W. Während der Innenwiderstand der Meßinstrumente für den jeweiligen Meßbereich den Datenblättern oder auch dem Skalenaufdruck zu entnehmen ist, kann man ihn für Spannungsmesser verhältnismäßig einfach bestimmen.

Dazu muß der Strom I bekannt sein, der für den Vollausschlag erforderlich ist. Aus praktischen Gründen gibt man den Kehrwert dieses Stroms in der Einheit Ohm pro Volt als Konstante an.

$$k = \frac{1}{I} \quad \frac{\Omega}{\text{V}}$$

Die Einheit für k scheint sich auf den ersten Blick nicht aus der Beziehung zu ergeben. Es gilt jedoch nach dem Ohmschen Gesetz

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

demnach ist

$$\frac{1}{I} = \frac{R}{U} \quad (\text{Einheit } \frac{\Omega}{\text{V}}).$$

Ist die Innenwiderstandskonstante für einen Spannungsmesser bekannt, so kann man den Innenwiderstand für jeden Spannungsmessbereich leicht bestimmen:

$$R_m = k \cdot U \quad \Omega$$

Beispiel:

Zum Vollausschlag eines Drehspul-Spannungsmessers ist eine Stromstärke von $50 \mu\text{A}$ erforderlich. Der Meßbereich beträgt 300 V (Vollausschlag).

Die Innenwiderstands-Konstante beträgt demnach:

$$k = \frac{1}{I} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 20000 \frac{\Omega}{\text{V}}$$

Für den 300-V-Meßbereich ergibt sich demnach ein Innenwiderstand von

$$\begin{aligned} R_m &= k \cdot U_m \\ &= 20000 \frac{\Omega}{\text{V}} \cdot 300 \text{ V} \\ R_m &= 6000000 \Omega = 6 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

10.3.4.3. Anzeigefehler (Klasseneinteilung)

Infolge einer Reihe von Einflüssen im Meßwerk selbst kann die Anzeige eines Meßinstruments nie 100%ig genau sein. So wirkt sich zwangsläufig die Lagerreibung der beweglichen Teile eines Meßwerks auf die Anzeigegenauigkeit aus. Kritisch kann auch der Temperatureinfluß werden. Da nahezu alle Wicklungen aus Kupferdraht hergestellt werden, ändert sich infolge des mit der Temperatur steigenden Kupferdrahtwiderstands der Innenwiderstand des Meßwerks. Vor- und Nebenwiderstände werden daher aus Manganin hergestellt. Manganin hat einen kaum von der Temperatur abhängigen spezifischen Widerstand. Die temperaturabhängige Änderung des Kupferdrahtwiderstands wird bei Meßinstrumenten häufig auch durch einen NTC-Widerstand (Kompensationsheißleiter) kompensiert.

Die bei einem Meßinstrument möglichen Anzeigefehler werden durch das sog. Klassenzeichen ausgedrückt. Das Klassenzeichen gibt die zulässige Abweichung des angezeigten Werts vom tatsächlichen Wert – bezogen auf den Vollausschlag – in % an.

Folgende Klassen sind genormt:

Geräteart	Klasse	zulässiger Anzeigefehler in % vom Vollausschlag
Feinmeßgeräte	0,1	$\pm 0,1$
	0,2	$\pm 0,2$
	0,5	$\pm 0,5$
Betriebsmeßgeräte	1	± 1
	1,5	$\pm 1,5$
	2,5	$\pm 2,5$
	5	± 5

Das Klassenzeichen wird auf der Skala eines Meßinstruments angegeben.

Der durch das Klassenzeichen angegebene zulässige Anzeigefehler bezieht sich stets auf den Meßbereichsendwert.

Beispiel:

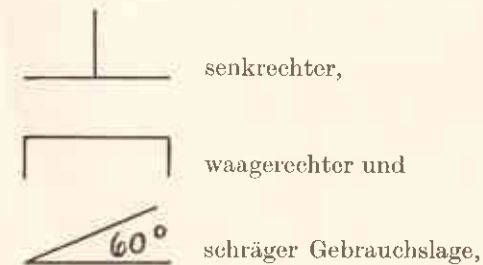
Voltmeter mit einem Meßbereich 250 V Klasse 2. Zulässiger Anzeigefehler also 2% von 250 V = 5 V!

Zeigt das Instrument 200 V an, so kann der tatsächliche Wert zwischen 195 V und 205 V liegen. (Der Fehler beträgt ca. 2,5%.) Würde man mit diesem Instrument eine Spannung von 20 V messen, so könnte der tatsächliche Wert zwischen 15 V und 25 V liegen und damit der Fehler bereits auf 25% gestiegen sein.

Der Meßbereich eines Meßinstruments sollte daher immer so gewählt werden, daß die Anzeige der Meßgröße im letzten Skalendrittel liegt. (Ausgenommen sind Ohmmeter, bei denen die Anzeige in der Skalenmitte am genauesten ist.)

10.3.4.4. Lageempfindlichkeit (Lagezeichen)

Die Meßgenauigkeit ist bei den meisten Meßinstrumenten von deren Lage abhängig. Mit einer Lageänderung verändert sich meistens auch die Lagerreibung der beweglichen Teile sowie das Gleichgewicht von Zeiger und Gegengewicht. Zur Erzielung einer hohen Meßgenauigkeit ist daher die Beachtung des Lagezeichens wichtig. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen



wobei der Neigungswinkel häufig angegeben wird. Der durch das Klassenzeichen angegebene Anzeigefehler wird nur in Grenzen gehalten, wenn das Meßinstrument in der vorgeschriebenen Gebrauchslage zur Messung verwendet wird. Das Lagezeichen findet man auf der Skala eines Instruments.

10.3.4.5. Prüfspannung

Nach VDE-Vorschriften werden Meßinstrumente und Meßgeräte auf Isolationsfähigkeit geprüft. Dabei ist die Prüfspannung immer erheblich höher als die Betriebsspannung, an der das Instrument bei Messungen liegen darf. Die Prüfspannung wird durch einen fünfzackigen Stern mit oder ohne Zahl auf der Skala eines Meßinstruments angegeben.

Dabei bedeuten:

Symbol	Prüfspannung	Zulässige Nennspannung (Betriebsspannung)
Stern ohne Zahl	500 V	bis 40 V
Stern mit Zahl 2	2 kV	40 bis 650 V
Stern mit Zahl 3	3 kV	650 bis 1000 V
Stern mit Zahl 5	5 kV	1000 bis 1500 V

10.3.4.6. Empfindlichkeit

Bei elektrischen Meßinstrumenten versteht man unter der Empfindlichkeit das Verhältnis von Anzeigeänderung zur Meßgrößenänderung, und zwar in der Einheit

$$\frac{\text{Länge (auf der Skala)}}{\text{Meßgröße}}$$

Für Spannungsmesser wird die Empfindlichkeit also in mm/V, für Strommesser in mm/A usw. angegeben.

Im allgemeinen gilt:

Hohe Empfindlichkeit entspricht geringem Eigenverbrauch.

10.3.5. Sinnbilder und Schaltzeichen

a) Sinnbilder für Meßwerke

	Drehspulmeßwerk		Dreheisenmeßwerk
	Drehspulmeßwerk mit Gleichrichter		dynamisches Meßwerk (eisenlos)
	Drehspulmeßwerk mit Thermoumformer		dynamisches Meßwerk (eisengeschlossen)
	elektrostatisches Meßwerk		Vibrationsmeßwerk
	Hitzdrahtmeßwerk		Bimetallmeßwerk

b) Sinnbilder für Gebrauchshinweise

	senkrechte Gebrauchslage		für Gleichstrom oder Gleichspannung
	waagerechte Gebrauchslage		für Wechselstrom oder Wechselspannung
	schräge Gebrauchslage		Achtung! Gebrauchsanweisung beachten!
	Zeigernullstellung		Schutzleiteranschluß
	Klassenzeichen für Anzeigefehler bezogen auf Meßbereichsendwert		Prüfspannungszeichen (hier z. B. 2 kV)
	Anzeige durch Zeiger		schreibendes Gerät
	Digitalanzeige		Anzeige durch Vibration
	trägheitsarm in der Anzeige		große Anzeigetragheit

c) Schaltzeichen

	Meßinstrument (allgemein)		Strommesser in Ampere geeicht
	Meßgerät (allgemein)		Spannungsmesser in Volt geeicht
	Meßinstrument mit Nullstellung in Skalenmitte		Spannungsmesser für Gleich- und Wechselspannung
	Meßinstrument mit Strom- und Spannungspfad (z. B. Wattmeter)		trägheitsarmes Meßinstrument (z. B. mit Oszillografenschleife)

10.3.6. Kennzeichen auf der Skala eines Meßinstruments

Über die Art, den Verwendungszweck und die meßtechnischen Eigenschaften eines Meßinstruments geben Symbole Auskunft, die auf der Skala des Instruments angegeben sind. Zu diesen Kennzeichen gehören:

- Meßeinheit (z. B. V, mV, A, μ A, W, Hz, Ω usw.),
- Art des eingebauten Meßwerks,
- Symbol für Zusatz-Schaltelemente, wie Gleichrichter oder Thermoumformer,
- Stromartzeichen (z. B. — für Gleich-, ~ für Wechselstrom),
- Klassenzeichen,
- Lagezeichen und
- Prüfspannungszeichen.

Eine Übersicht über Kennzeichen und Symbole finden Sie auf der vorhergehenden Seite.

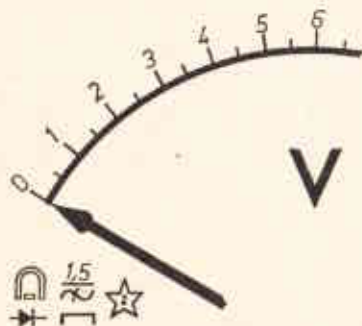


Abb. 10.28 – Skalenausschnitt mit Kennzeichen

Abb. 10.28 zeigt den Skalenausschnitt eines Meßinstruments mit den entsprechenden Kennzeichen (als Beispiel).

In diesem Beispiel handelt es sich um ein Meßinstrument mit eingebautem Drehspulmeßwerk mit Gleichrichter, geeignet für Gleich- und Wechselspannungsmessungen. Das Instrument ist mit 2 kV geprüft worden und für waagerechte Gebrauchslage vorzusehen. Die Anzeigegenauigkeit beträgt nach dem Klassenzeichen 1,5% vom Skalenendwert.

10.3.7. Meßbereichserweiterung bei Spannungs- und Strommessern

Unter Berücksichtigung der nach der Prüfspannung zugelassenen Nennspannung läßt sich der Meßbereich von Spannungs- und Strommessern zu größeren Werten hin in weiten Grenzen ändern. Dazu werden Widerstände in Reihe oder parallel zum Meßinstrument geschaltet.

Ist die Netzspannung, an der gemessen werden muß, zu hoch oder die Meßgröße für das Meßinstrument zu groß, so können in Wechselstromkreisen Meßwandler eingesetzt werden. Man unterscheidet Spannungs- und Stromwandler. **Spannungswandler** sind Transformatoren mit einem genauen Windungszahlenverhältnis, bei denen die hohe Meßwechselspannung auf eine niedrigere Spannung heruntergespannt wird. Das mit der Niederspannungswicklung verbundene Meßinstrument wird normalerweise für die Oberspannung (= zu messende Spannung) geeicht.

Stromwandler besitzen primär wenige und sekundär viele Windungen und setzen dadurch den Strom herab. Damit ermöglichen sie die Messung starker Ströme durch

Strommesser mit verhältnismäßig niedrigem Meßbereich. Auch hier wird die Skala des Strommessers für den starken Strom (= zu messenden Strom) geeicht.

Nicht jedes Meßwerk ist für eine Meßbereichserweiterung geeignet. Darum ist grundsätzlich zunächst festzustellen, welcher Art das im Instrument eingebaute Meßwerk ist. Die Eignung der Meßwerke ist den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

Nach DIN müssen bei der Meßbereichserweiterung mehrere **Meßbereiche eines Instruments im Verhältnis**

1 : 2, 1 : 5 oder 1 : 10 stehen.

Ebenso sind Meßbereichsendwerte nach DIN 43701 genormt:

Meßbereichs-Endwerte					
1	1,5	2,5	3*)	4	6
10	15	25	30*)	40	60
100	150	250	300*)	400	600
Die Skalen können in den Einheiten μ A, mA, A, kA oder mV, V, kV geeicht sein.					

*) Reihe nicht genormt, aber häufig angewandt.

10.3.7.1. Meßbereichserweiterung bei Spannungsmessern

Geeignet sind nur Spannungsmesser mit eingebautem Drehspul- oder Dreheisenmeßwerk. Fehler, die sich infolge des Temperatureinflusses ergeben, machen sich beim Dreheisenmeßwerk erheblich stärker bemerkbar, da die Feldspule im Gegensatz zur Drehspule mehr Windungen bei größerem Spulendurchmesser enthält.

Die zur Meßbereichserweiterung verwendeten Widerstände müssen zur Vermeidung von Meßfehlern infolge Temperatureinflusses einen möglichst **geringen Temperaturbeiwert** besitzen. Aus diesem Grunde werden Meßwiderstände vorwiegend aus dem Widerstandsmaterial Manganin hergestellt.

Sollen mit einem Spannungsmesser **größere Spannungen** gemessen werden als nach dem Meßbereich möglich, so kann der Meßbereich durch Vorschalten eines **Reihenwiderstands** erweitert werden.

Dabei wird die für die Reihenschaltung von Widerständen geltende Gesetzmäßigkeit

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

ausgenutzt; d.h., in einer Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die zugehörigen Einzelwiderstände. Bei einem Spannungsmesser darf die Teilspannung U_m , die am Meßinstrument liegt, höchstens Vollausschlag bewirken. Die überschüssige Teilspannung U_v muß am Vorwiderstand abfallen.

Für die Meßbereichserweiterung eines Spannungsmessers gilt demnach:

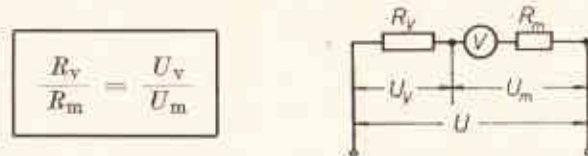


Abb. 10.29

In dieser Formel bedeuten:

R_v = zusätzlicher Vorwiderstand,

R_m = Widerstand des Meßinstruments,

U_v = Spannungsüberschuß und

U_m = Spannung, die zum Vollausschlag des Instruments führt.

Der Spannungsüberschuß wird aus der Beziehung

$$U_v = U - U_m$$

bestimmt, wobei U = neuer Meßbereichsendwert.

Ist die Innenwiderstands-Konstante für das eingebaute Meßwerk bekannt, so kann man den zur Spannungsmößbereichserweiterung erforderlichen Vorwiderstand einfach bestimmen:

$$R_v = k \cdot U_v \quad \Omega$$

In dieser Formel bedeuten:

R_v = zusätzlicher Vorwiderstand in Ohm,

k = Innenwiderstands-Konstante in Ohm pro Volt,

U_v = Spannungsüberschuß in Volt.

1. Beispiel:

Der Meßbereich eines Spannungsmessers, dessen Innenwiderstand 2500Ω beträgt, soll von 3 V auf 15 V erweitert werden.

Gegeben: $U_m = 3 \text{ V}$; $R_m = 2500 \Omega$; $U = 15 \text{ V}$

Gesucht: R_v

Lösung: $\frac{R_v}{R_m} = \frac{U_v}{U_m}$

$$R_v = \frac{R_m \cdot U_v}{U_m}$$

$$U_v = U - U_m$$

$$U_v = 15 \text{ V} - 3 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

$$R_v = \frac{2500 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 12 \text{ V}}{3 \text{ V}} = 10\,000 \Omega$$

Zur Meßbereichserweiterung muß ein Widerstand von $10\,000 \Omega$ vor den Spannungsmesser geschaltet werden.

2. Beispiel:

Die Innenwiderstands-Konstante für ein Spannungsmößinstrument beträgt $20\,000 \text{ Ohm pro Volt}$. Der Meßbereich soll von 6 V auf 30 V erweitert werden.

Gegeben: $U_m = 6 \text{ V}$; $k = 20\,000 \frac{\Omega}{\text{V}}$; $U = 30 \text{ V}$

Gesucht: R_v

Lösung: $R_v = k \cdot U_v$
 $U_v = U - U_m$
 $U_v = 30 \text{ V} - 6 \text{ V} = 24 \text{ V}$

$$R_v = 20\,000 \frac{\Omega}{\text{V}} \cdot 24 \text{ V} = 480\,000 \Omega$$

$$R_v = 480 \text{ k}\Omega$$

Zur Meßbereichserweiterung ist ein Vorwiderstand von $480 \text{ k}\Omega$ erforderlich.

10.3.7.2. Meßbereichserweiterung bei Strommessern

Eine Erweiterung des Strom-Meßbereichs durch Nebenwiderstände wird fast ausschließlich bei Meßinstrumenten mit Drehspulmeßwerken angewendet. Bei Dreheisenmeßwerken hängt der Vollausschlag von der magnetischen Durchflutung (Amperewindungszahl) der Feldspule ab. Wegen der verhältnismäßig hohen Induktivität der Feldspule würde sich beim Parallelschalten eines Nebenwiderstands eine stark frequenzabhängige Stromverzweigung bei Wechselstrommessungen ergeben. Aus diesem Grunde wird die Erweiterung des Strommeßbereichs bei Dreheisenmeßwerken durch Umschalten von Abgriffen an der Feldspule vorgenommen.

Der Strom-Meßbereich von Drehspulmeßwerken kann durch Parallelschalten von Nebenwiderständen erweitert werden.

Sollen Ströme gemessen werden, die größer sind als der zum Vollausschlag des Zeigers erforderliche Strom, so kann der „überschüssige“ Strom durch genau be-

gemessene Nebenwiderstände abgeleitet werden. Hierfür wird die für die Parallelschaltung von Widerständen bekannte Gesetzmäßigkeit

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

ausgenutzt; d.h., in einer Parallelschaltung von Widerständen verhalten sich die Zweigströme umgekehrt wie die zugehörigen Zweigwiderstände.

Für die Meßbereichserweiterung eines Strommessers gilt:

$$\frac{R_N}{R_m} = \frac{I_m}{I_N}$$

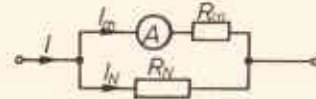


Abb. 10.30

In dieser Formel bedeuten:

R_N = zusätzlicher Nebenwiderstand (Parallelwiderstand),
 R_m = Widerstand des Strommessers,
 I_m = Meßbereichsendwert des Strommessers
 (vor der Bereichserweiterung) und
 I_N = Stromüberschuß.

Der Stromüberschuß ist aus der Beziehung

$$I_N = I - I_m$$

zu bestimmen, wobei I = neuer Meßbereichsendwert.

Beispiel:

Der Meßbereich eines Milliampereometers, das bei 600 mA Vollausschlag einen Innenwiderstand von $0,5 \Omega$ besitzt, soll für Messungen bis 3 A erweitert werden.

Gegeben: $I_m = 600 \text{ mA}$; $R_m = 0,5 \Omega$; $I = 3 \text{ A}$

Gesucht: R_N

Lösung: $\frac{R_N}{R_m} = \frac{I_m}{I_N}$

$$R_N = \frac{R_m \cdot I_m}{I_N}$$

$$I_N = I - I_m = 3 \text{ A} - 0,6 \text{ A} = 2,4 \text{ A}$$

$$R_N = \frac{0,5 \Omega \cdot 0,6 \text{ A}}{2,4 \text{ A}} = \frac{0,3}{2,4} \Omega$$

$$R_N = \underline{\underline{0,125 \Omega}}$$

Zur Meßbereichserweiterung muß ein Widerstand von $0,125 \Omega$ parallelgeschaltet werden.

Für die richtige Wahl des Widerstandsmaterials für Nebenwiderstände gilt ebenfalls: Zur Vermeidung von Meßfehlern, die sich infolge Wider-

standsänderung durch Temperatureinfluß ergeben können, ist für Nebenwiderstände ein Widerstandsmaterial mit möglichst **geringem Widerstands-Temperaturbeiwert** zu wählen (z. B. Manganin).

Da **Wattmeter** einen Spannungs- und einen Strompfad besitzen, kann ihr Meßbereich durch Vorwiderstände im Spannungspfad und Nebenwiderstände im Strompfad erweitert werden. Je nach Meßgröße kann diese Bereichserweiterung entweder nur im Spannungs- oder nur im Strompfad oder aber auch gemeinsam vorgenommen werden.

10.4. Messung elektrotechnischer Grundgrößen

10.4.1. Spannungsmessung

10.4.1.1. Direkte Spannungsmessung

Da bei einer Parallelschaltung von Widerständen an jedem Parallelzweig die gleiche Spannung liegt, gilt für das Einschalten eines Spannungsmessers:

Ein Spannungsmesser ist parallel zum Meßobjekt zu schalten!

Für Gleichspannungsmessungen ist auf die **richtige Polarität** zu achten. Es gilt: $\oplus$ -Anschluß des Spannungsmessers an $\oplus$ -Pol oder $\oplus$ -Potential.

Bei der Spannungsmessung ist zu beachten, daß neben Anzeige Fehlern, die ihre Ursache im Instrument selbst haben (z.B. Klasse, falsche Lage, Temperatur), zusätzliche Meßfehler durch das Einschalten des Spannungsmessers entstehen. Da ein Spannungsmesser einen Eigenverbrauch an elektrischer Leistung hat, belastet er bei der Messung die Spannungsquelle und verursacht durch Stromaufnahme Spannungsabfälle in Reihewiderständen bzw. eine Stromverzweigung zwischen den Anschlußpunkten. Diese Fehlerquelle wollen wir an zwei einfachen Beispielen untersuchen. Für beide Beispiele wählen wir die gleiche Meßschaltung nach Abb. 10.31. Danach soll die Spannung am Widerstand R_2 der Schaltung gemessen werden.

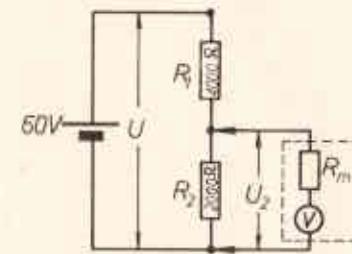


Abb. 10.31

Die Spannung U soll in beiden Beispielen 60 V betragen.

Für die erste Messung verwenden wir ein Voltmeter mit der Innenwiderstands-

Konstante $100 \frac{\Omega}{V}$. Die Berechnung der Teilspannung an R_2 ohne Voltmeter ergibt:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \text{ V} \cdot 2000 \Omega}{4000 \Omega + 2000 \Omega}$$

$$U_2 = \frac{120\,000}{6\,000} \text{ V} = \underline{\underline{20 \text{ V}}}$$

Unser Spannungsmesser müßte also 20 V anzeigen. Wir wählen den Meßbereich 25 V. Für diesen Meßbereich ergibt sich ein Innenwiderstand von

$$R_m = k \cdot U$$

$$R_m = 100 \frac{\Omega}{V} \cdot 25 V = 2500 \Omega.$$

Schalten wir das Meßgerät parallel zu R_2 , so ergeben sich folgende Werte:

$$R_1 = 4000 \Omega$$

$$R_2 \parallel R_m = \frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m} = \frac{2000 \Omega \cdot 2500 \Omega}{2000 \Omega + 2500 \Omega} = 1110 \Omega.$$

Berechnen wir aber jetzt die Teilspannung, die an der Parallelschaltung $R_2 \parallel R_m$, also auch am Voltmeter liegt, so erhalten wir:

$$\frac{U_{2\parallel m}}{U} = \frac{R_2 \parallel R_m}{R} = \frac{R_2 \parallel R_m}{R_1 + R_2 \parallel R_m}$$

$$U_{2\parallel m} = \frac{U \cdot R_2 \parallel R_m}{R_1 + R_2 \parallel R_m} = \frac{60 V \cdot 1110 \Omega}{4000 \Omega + 1110 \Omega}$$

$$U_{2\parallel m} = \frac{66\,600}{5\,110} V = \underline{\underline{13 V.}}$$

Anstelle der tatsächlichen Spannung von 20 V würde der Spannungsmesser nur 13 V anzeigen. Der durch das Einschalten des Meßinstruments verursachte Fehler beträgt 35 %!

Das für die zweite Messung verwendete Meßinstrument soll $10\,000 \frac{\Omega}{V}$ haben. Für den 25-V-Meßbereich ergibt sich somit ein Innenwiderstand von

$$R_m = k \cdot U = 10\,000 \frac{\Omega}{V} \cdot 25 V = 250\,000 \Omega$$

Für die Parallelschaltung $R_2 \parallel R_m$ ergibt sich nun:

$$\begin{aligned} R_2 \parallel R_m &= \frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m} = \frac{2000 \Omega \cdot 250\,000 \Omega}{2000 \Omega + 250\,000 \Omega} \\ &= \frac{500\,000\,000}{252\,000} \Omega = 1985 \Omega \end{aligned}$$

Die am Meßinstrument liegende Teilspannung errechnet sich zu

$$\frac{U_{2\parallel m}}{U} = \frac{R_2 \parallel R_m}{R}$$

$$U_{2\parallel m} = \frac{U \cdot R_2 \parallel R_m}{R} = \frac{60 V \cdot 1985 \Omega}{4000 \Omega + 1985 \Omega}$$

$$U_{2\parallel m} = \frac{119\,100}{5985} V = \underline{\underline{19,9 V.}}$$

Ergebnis: Die Messung mit dem hochohmigen Voltmeter ist erheblich genauer. Der Fehler beträgt nur noch 0,5 %!

Aus den Beispielen folgt:

Ein Spannungsmesser muß einen möglichst großen Innenwiderstand R_m besitzen!

Da der Begriff „möglichst groß“ weitläufig ist, kann für die Praxis folgende Richtlinie angewendet werden:

Soll der Fehler durch Einschalten eines Spannungsmessers weniger als 1% betragen, so muß der Innenwiderstand des Spannungsmessers mindestens 100mal so groß wie der Widerstand des Meßobjekts sein.

Als Widerstand des Meßobjekts gilt der Gesamtwiderstand, der zwischen den Anschaltunkten des Spannungsmessers liegt.

Den Innenwiderstand eines Spannungsmessers kann man – wie schon erwähnt – aus der Innenwiderstands-Konstante für jeden Meßbereich eines Instruments bestimmen:

$$R_m = k \cdot U_m \quad \Omega$$

In dieser Formel bedeuten:

R_m = Innenwiderstand des Instruments in Ω ,

k = Innenwiderstands-Konstante in $\frac{\Omega}{V}$ und

U_m = Spannungsmeßbereich in V (Vollausschlag).

Damit Anzeigefehler (Klassenzeichen!) im Instrument selbst gering gehalten werden, gilt ferner:

Der Meßbereich eines Spannungsmessers ist immer so zu wählen, daß die Anzeige mindestens im letzten Drittel der Skala liegt.

10.4.1.2. Indirekte Spannungsmessung

Besonders in der Fernmeldetechnik müssen häufig Spannungen an sehr hochohmigen Meßobjekten gemessen werden (z.B. 2 V an 1 M Ω). Selbst ein Spannungsmeßinstrument mit 100 k Ω /V würde hier zu Meßfehlern bis zu 80% führen. Da Röhren- oder Transistor-Voltmeter nicht immer zur Verfügung stehen, sei hier auf die Möglichkeit der indirekten Spannungsmessung verwiesen.

Zur indirekten Spannungsmessung muß der Widerstand des Meßobjekts bekannt sein. Mißt man den Strom, der durch den bekannten Widerstand fließt, kann man den Spannungsabfall nach dem Ohmschen Gesetz berechnen: $U = I \cdot R$.

Beispiel:

Vorhanden ist ein Mikroamperemeter mit 10 μ A Vollausschlag ($k = 100$ k Ω /V), Klasse 1. Es soll an einem 1 M Ω -Widerstand eine Spannung von 2 V gemessen werden.

werden, daß es selbst von diesem Strom durchflossen wird (vgl.: Wasseruhr). Daher gilt:

Ein Strommesser ist mit dem Meßobjekt in Reihe zu schalten.

Für Gleichstrommessungen ist auf **richtige Polarität** zu achten! Dabei gilt: Ein Gleichstrommeßinstrument ist so zu schalten, daß der Strom vom $\oplus$ -Anschluß des Strommessers zum $\ominus$ -Anschluß fließt; also $\oplus$ -Anschluß an $\oplus$ -Potential legen.

Auch bei der Strommessung wird durch das Einschalten des Strommessers mit seinem Innenwiderstand ein mehr oder weniger großer Fehler verursacht: Durch das Einschalten eines weiteren Widerstands (R_m des Strommessers) erhöht sich der Gesamtwiderstand der Schaltung und der Strom wird geringer.

Wir wollen diese Fehlerquelle wieder an zwei einfachen Beispielen untersuchen (Abb. 10.34). Der Strom in der angegebenen Schaltung soll gemessen werden.

Für die erste Messung wird ein Amperemeter 1,5 A mit $R_m = 1 \Omega$ verwendet. Ohne Amperemeter müßte nach den angegebenen Werten ein Strom von

$I = \frac{U}{R} = \frac{6 \text{ V}}{5 \Omega} = 1,2 \text{ A}$ fließen. Durch das Einschalten des Amperemeters erhöht sich jedoch der Stromkreiswiderstand auf $5 \Omega + 1 \Omega = 6 \Omega$. Somit fließt nur

noch ein Strom der Stärke $\frac{6 \text{ V}}{6 \Omega} = 1 \text{ A}$. Der Meßfehler beträgt rd. 17%!

Verwenden wir bei der zweiten Messung ein Amperemeter 1,5 A mit einem Innenwiderstand von $0,05 \Omega$, so beträgt der Stromkreiswiderstand einschließlich Amperemeter $5,05 \Omega$. Damit ergibt sich ein Strom von

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6 \text{ V}}{5,05 \Omega} = 1,19 \text{ A}.$$

Der Fehler beträgt jetzt nur rd. 0,8%!

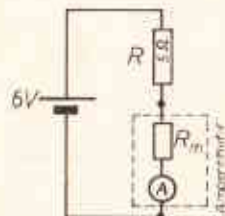


Abb. 10.34

Aus den Beispielen können wir folgern:

Ein Strommesser soll einen möglichst kleinen Innenwiderstand R_m besitzen!

Für die Praxis kann dabei folgende Richtlinie angewendet werden:

Soll der durch das Einschalten eines Strommessers bedingte Meßfehler unter 1% liegen, so muß der Innenwiderstand des Strommessers weniger als $\frac{1}{100}$ des Gesamtwiderstands im Meßstromkreis betragen.

Für die Messung von Wechselströmen gilt sinngemäß das gleiche wie für die Messung von Wechselspannungen (vgl. hierzu Abschn. 10.4.1.3).

10.4.2.2. Indirekte Strommessung

Das Einschalten eines Strommeßinstruments in den Meßstromkreis bedingt zwangsläufig eine Auftrennung des Kreises und damit eine Unterbrechung.

Soll in einem Betriebsstromkreis ohne Stromunterbrechung eine Strommessung vorgenommen werden, so ist hier eine indirekte Strommessung möglich. Dazu muß im Stromkreis ein ohmscher Widerstand in seinem Widerstandswert genau bekannt sein. An diesem Widerstand wird der Spannungsabfall mit einem Voltmeter gemessen. Aus gemessener Spannung und dem bekannten Widerstandswert läßt sich der fließende Strom nach dem Ohmschen Gesetz berechnen:

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

Zweckmäßig wäre ein Widerstandswert von z. B. 1Ω oder $0,1 \Omega$, da dann die Berechnung der Stromstärke sehr einfach ist. Dieses Verfahren ist auch vorteilhaft, wenn nur ein Spannungsmesser zur Verfügung steht.

10.4.2.2.1. Indirekte Messung überlagerten Wechselströme

Die Messung des Wechselstromanteils an mit Wechselstrom überlagertem Gleichstrom ist mit einfachen Mitteln nicht so ausführend genau durchführbar wie die Messung überlagerten Wechselspannungen. Daher empfiehlt sich hier, die indirekte Strommessung anzuwenden. Dazu muß – wie bei der allgemeinen indirekten Strommessung – ein ohmscher Widerstand bekannter Größe im Stromkreis liegen (z. B. 1Ω oder 10Ω).

Da die indirekte Strommessung auf einer Spannungsmessung an einem bekannten Widerstand beruht, wird zur Messung des Wechselstromanteils bei überlagertem Wechselstrom lediglich ein Kondensator C_v vor das Wechselspannungsmeßgerät geschaltet. Für die Größe der Kapazität gilt der Hinweis unter 10.4.1.3.1 sinngemäß.

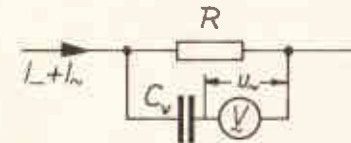


Abb. 10.35 – Indirekte Messung überlagerten Wechselströme

Aus dem gemessenen Wechselspannungsanteil und dem bekannten Widerstand läßt sich dann die Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz berechnen:

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

10.4.3. Leistungsmessung

Eine direkte Messung der Wirkleistung ist in Gleich- und Wechselstromkreisen mit dem Wattmeter möglich. Wattmeter sind Leistungsmeßinstrumente mit eingebautem elektrodynamischem Meßwerk.

Da elektrodynamische Meßwerke eine feste Spule und eine Drehspule enthalten, ist beim Wattmeter zwischen dem Strompfad (feste Spule) und dem Spannungspfad (Drehspule) zu unterscheiden. Die Schaltungsart ist durch die Bezeichnung festgelegt:

Der Strompfad ist mit dem Verbraucher in Reihe, der Spannungspfad parallel zum Verbraucher zu schalten.

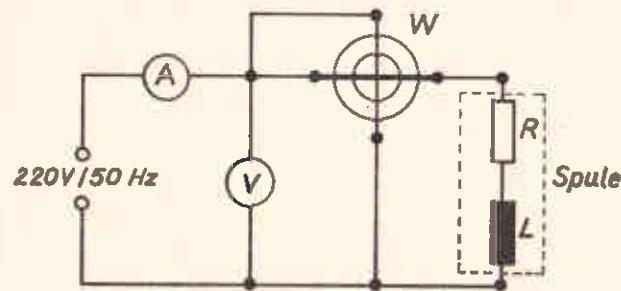


Abb. 10.36 – Meßschaltung zur Bestimmung der Wirk-, Schein- und Blindleistung

Aufgrund seiner physikalischen Wirkungsweise zeigt ein Wattmeter in Gleich- und Wechselstromkreisen die vom Verbraucher aufgenommene Wirkleistung an.

Mit Hilfe einer zusätzlichen Strom- und Spannungsmessung (Ampere- und Voltmeter) kann in Wechselstromkreisen zudem die Schein- und die Blindleistung berechnet werden.

Steht kein Wattmeter zur Verfügung, so kann in Gleichstromkreisen die von einem Verbraucher aufgenommene Wirkleistung durch eine Strom- und Spannungsmessung bestimmt werden. Die Leistung ergibt sich dann aufgrund der Beziehung:

$$P = U \cdot I \quad W$$

10.4.4. Widerstandsmessung

Bei der Widerstandsmessung müssen wir im wesentlichen zwischen drei Arten unterscheiden:

- direkte Messung mit dem Ohmmeter,
- indirekte Messung (Spannungs- und Strommessung),
- Widerstandsbestimmung mit der Meßbrücke.

10.4.4.1. Direkte Widerstandsmessung

Die zur direkten Widerstandsmessung verwendeten Ohmmeter enthalten eine Spannungsquelle, einen zur Eichung veränderbaren Widerstand und einen veränderbaren magnetischen Nebenschluß am Meßwerk und einen Strommesser, dessen Skala in Ohm geeicht ist (ggf. kΩ, MΩ u. ä.). Eine Prinzipschaltung ist in Abb. 10.37 dargestellt.

Bleibt in einem geschlossenen Stromkreis die Spannung konstant, so verändert sich nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke in Abhängigkeit vom Widerstand. Je größer der Widerstand im Stromkreis ist, desto geringer ist die Stromstärke. Da die Skala des eingebauten Strommessers in

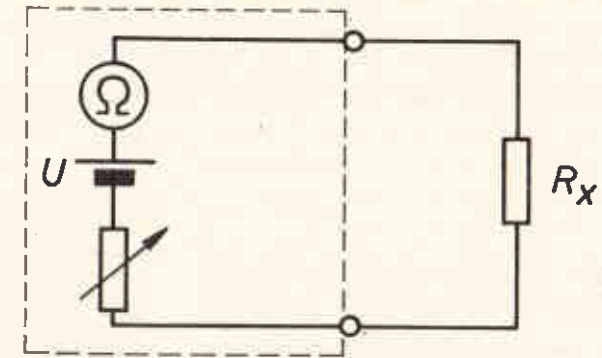


Abb. 10.37 – Widerstandsmessung mit dem Ohmmeter

Ohm geeicht wird, muß sie umgekehrt wie eine Strom- oder Spannungsskala verlaufen:

Bei 0 Ohm Vollausschlag des Zeigers,
bei ∞ Ohm dagegen kein Zeigerausschlag.

Aufgrund der Beziehung $I = \frac{U}{R}$ ergibt sich leider kein linearer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Widerstand. Man sagt: Stromstärke und Widerstand sind umgekehrt verhältnismäßig (umgekehrt proportional).

Anhand eines Beispiels wollen wir einmal eine Eichkurve und die zugehörige Skalenteilung eines Ohmmeters ableiten.

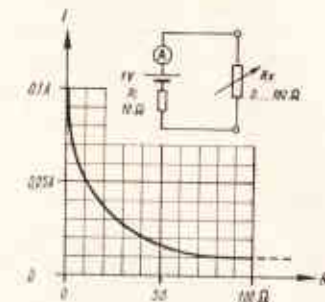


Abb. 10.38 – Skaleneichung eines Ohmmeters

Wir wählen einen geschlossenen Stromkreis mit einer Spannungsquelle von 1 V ($R_1 = 10 \Omega$), einem veränderbaren Widerstand $R_x = 0$ bis 100Ω und einem Milliampereometer mit Vollausschlag bei 100 mA. Wenn wir für die Widerstandswerte R_x zwischen 0 und 100Ω die zugehörigen Stromstärken berechnen und die Werte in ein Diagramm eintragen, erhalten wir nebenstehende Kurve. Sie läßt erkennen, daß Widerstandsänderungen bei kleinen Werten von R_x noch große Stromänderungen bewirken. Je größer aber der Widerstand R_x wird, desto geringer wird die Stromänderung. Unter dem Diagramm ist die Skala des Meßwerks dargestellt, und zwar sowohl in Ohm als auch in Ampere geeicht.

Wir erkennen:

Für Werte von R_x zwischen 0 und 90 Ohm ändert sich die Stromstärke um 90 mA. Dagegen beträgt die Stromänderung nur noch 10 mA, wenn sich der Widerstandswert für R_x von 90 bis ∞ Ohm erhöht! Das bedeutet für die in Ohm geeichte Skala, daß auf 90% des Bereichs Widerstandswerte von 0 bis 90 Ohm, auf 10% der Skalenlänge die Werte von 90 bis ∞ Ohm abgetragen werden müssen.

Die Ohmskala wird also gegen ∞ sehr ungenau. Zur Erzielung einer hohen Meßgenauigkeit gilt daher:

Die Anzeige eines Ohmmeters ist in der Skalenmitte am größten.

Die Anzeigegegenauigkeit wird in der Nähe von 0 Ohm (= Vollausschlag) wieder geringer, da Fehler bei der Eichung auftreten können oder die Spannung der eingebauten Spannungsquelle (z. B. galv. Element) während einer Messung nicht konstant bleibt. Bei der Auswahl des Widerstands-Meßbereichs ist daher immer der Widerstandswert auf der Skalenmitte entscheidend. Der Innenwiderstand eines Ohmmeters ist gleich dem auf der Skalenmitte (gültiger Meßbereich) angegebenen Widerstandswert.

Der Innenwiderstand des Ohmmeters nach Abb. 10.38 beträgt z. B. 10 Ω .

Als Spannungsquelle wird in den meisten Ohmmetern eine Trockenbatterie verwendet, deren Spannung während längeren Gebrauchs nicht konstant bleibt. Ebenso sinkt die Spannung einer Trockenbatterie infolge längerer Lagerzeit. Deshalb enthält ein Ohmmeter zur Eichung einen veränderbaren Widerstand oder einen im Meßwerk eingebauten veränderbaren magnetischen Nebenschluß zur Empfindlichkeitseinstellung.

Vor jeder Widerstandsmessung ist ein Ohmmeter an den Klemmen kurzzuschließen und auf Null (= Vollausschlag) zu eichen. Die Ablesung des Skalenwerts soll so kurzzeitig wie möglich vorgenommen werden.

Kann bei der Eichung kein Vollausschlag erzielt werden, so ist die Batterie gegen eine frische auszuwechseln. Sollen hochohmige Widerstände gemessen werden, so führen kleine Spannungen in der Größenordnung von 1 Volt wegen der begrenzten Empfindlichkeit des Meßwerks nicht mehr zu einem ausreichenden Zeigerausschlag. Ohmmeter zur Messung großer Widerstände enthalten daher entweder eine Batterie höherer Spannung (ca. 10 bis 75 V) oder einen Kurbelinduktor mit mechanischer Drehzahlregelung (z. B. Isolationsmesser in Abb. 10.39 rechts).

Folgende Abbildungen zeigen einige gebräuchliche Ohmmeter.

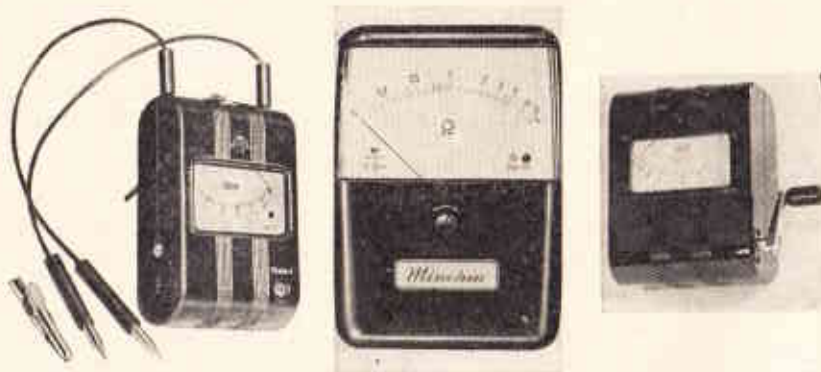


Abb. 10.39 – Ohmmeter

Da jede Spannungsänderung in einem Stromkreis mit konstantem Widerstand zu einer Stromänderung führt, darf die **Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter nur an Widerständen vorgenommen werden, die nicht an einer Spannung liegen!**

10.4.4.2. Indirekte Widerstandsmessung

Zur Bestimmung von Widerständen kann man auch eine Spannungs- und Strommessung benutzen, wobei der Widerstandswert nach dem Ohmschen Gesetz berechnet werden kann. Wir haben aber bereits festgestellt, daß die Anzeige von Spannungs- und Strommeßinstrumenten wegen ihres eigenen inneren Widerstands nicht unbedingt ausreichend genau ist. Diese Tatsache ist bei der indirekten Widerstandsmessung besonders zu beachten, da wir ja dabei gleichzeitig zwei Meßinstrumente einschalten. Um Meßfehler gering zu halten, müssen wir grundsätzlich zwei Meßschaltungen unterscheiden:

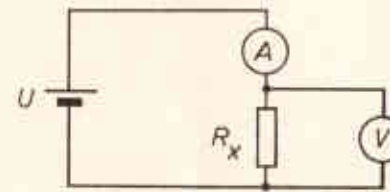


Abb. 10.40 – Meßschaltung
für kleine Widerstände
(Fehler durch Voltmeter)

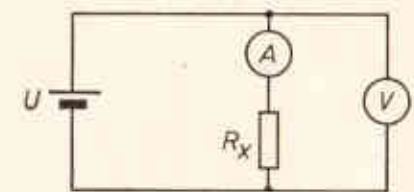


Abb. 10.41 – Meßschaltung
für große Widerstände
(Fehler durch Amperemeter)

Damit wir die Schaltungen beurteilen lernen, wollen wir zwei Beispiele besprechen:

1. Beispiel:

Wir wählen einen Widerstand von $R_x = 1 \Omega$, ein Amperemeter mit 1 A Vollausschlag ($R_{Am} = 1 \Omega$), ein Voltmeter mit 1 V Vollausschlag ($R_{Vm} = 100 \Omega$) und eine Spannungsquelle mit 1 V Spannung.

Der gesuchte Widerstandswert ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz aus

$$R_x = \frac{\text{Anzeige des Voltmeters}}{\text{Anzeige des Amperemeters}}$$

Wir wollen einmal errechnen, welchen Wert die beiden Instrumente tatsächlich anzeigen würden:

Nach Schaltung 10.40:

$$R_x = \frac{U_{Vm}}{I_{Am}}$$

$$U_{Vm} = I \cdot R_x \parallel V_m$$

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

$$R = R_{Am} + R_x \parallel V_m$$

$$= 1 \Omega + \frac{1 \Omega \cdot 100 \Omega}{1 \Omega + 100 \Omega} = 1 \Omega + 0,99 \Omega$$

$$R = 1,99 \Omega$$

$$I = \frac{1 \text{ V}}{1,99 \Omega} = 0,502 \text{ A} \hat{=} \text{Anzeige des Amperemeters}$$

$$U_{Vm} = 0,502 \text{ A} \cdot 0,99 \Omega = 0,497 \text{ V} \hat{=} \text{Anzeige des Voltmeters}$$

$$R_x = \frac{0,497 \text{ V}}{0,502 \text{ A}} = \underline{\underline{0,99 \Omega}}$$

Der Meßfehler beträgt also nur 1%.

Nach Schaltung 10.41:

$$R_x = \frac{U_{Vm}}{I_{Am}}$$

$$U_{Vm} = U = 1 \text{ V} \hat{=} \text{Anzeige des Voltmeters}$$

$$I_{Am} = \frac{U}{R_{Am} + R_x} = \frac{1 \text{ V}}{1 \Omega + 1 \Omega} = 0,5 \text{ A} \hat{=} \text{Anzeige des Amperemeters}$$

$$R_x = \frac{1 \text{ V}}{0,5 \text{ A}} = \underline{\underline{2 \Omega}}$$

Nach Schaltung 10.41 ergibt sich ein Fehler von 100%!

Folgerung:

Für kleine Widerstände ist nur die Meßschaltung 10.40 geeignet.

2. Beispiel:

Der zu messende Widerstand soll 1000mal so groß wie im 1. Beispiel gewählt werden. Um zu brauchbaren Strömen zu kommen, wird die Spannung auf 10 V erhöht. Jetzt ist zu beachten, daß sich auch die Widerstände der Instrumente infolge Umschaltens auf einen anderen Meßbereich ändern!

Folgende Werte sollen zugrunde gelegt werden: $R_x = 1000 \Omega$; Milliampereometer mit 20 mA Vollausschlag ($R_{Am} = 50 \Omega$); Voltmeter mit 10 V Vollausschlag ($R_{Vm} = 1000 \Omega$). Spannungsquelle 10 V.

Nach Schaltung 10.40:

$$R_x = \frac{U_{Vm}}{I_{Am}}$$

$$U_{Vm} = I \cdot R_x \parallel V_m$$

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

$$R = R_{Am} + R_x \parallel V_m$$

$$= 50 \Omega + \frac{1000 \Omega \cdot 1000 \Omega}{1000 \Omega + 1000 \Omega} = 50 \Omega + 500 \Omega$$

$$R = 550 \Omega$$

$$I = \frac{10 \text{ V}}{550 \Omega} = 0,0182 \text{ A} \hat{=} \text{Anzeige des Amperemeters}$$

$$U_{Vm} = 0,0182 \text{ A} \cdot 500 \Omega = 9,1 \text{ V} \hat{=} \text{Anzeige des Voltmeters}$$

$$R_x = \frac{9,1 \text{ V}}{0,0182 \text{ A}} = \underline{\underline{500 \Omega}}$$

Der Meßfehler beträgt 100%!

Nach Schaltung 10.41:

$$R_x = \frac{U_{Vm}}{I_{Am}}$$

$$U_{Vm} = U = 10 \text{ V} \hat{=} \text{Anzeige des Voltmeters}$$

$$I_{Am} = \frac{U}{R_{Am} + R_x} = \frac{10 \text{ A}}{50 \Omega + 1000 \Omega} = \frac{10 \text{ V}}{1050 \Omega}$$

$$I_{Am} = 0,00953 \text{ A} \hat{=} \text{Anzeige des Amperemeters}$$

$$R_x = \frac{10 \text{ V}}{0,00953 \text{ A}} = \underline{\underline{1050 \Omega}}$$

Hier beträgt der Meßfehler nur noch 5%.

Folgerung:

Für große Widerstände ist nur die Meßschaltung nach Abb. 10.41 geeignet.

Das zweite Beispiel zeigt aber auch, daß sich bei großen Widerständen R_x das Verhältnis von Meßobjekt (R_x) zum Innenwiderstand des Meßinstruments ungünstig verändert, so daß die Meßgenauigkeit deutlich geringer wird.

10.4.4.3. Meßbrücke

Die Meßbrücke läßt die genaueste Messung von Widerständen zu, da bei ihr keine Fehler durch das Einschalten von Meß- oder Anzeigeinstrumenten auftreten können. Wegen ihrer hohen Meßgenauigkeit wird die Meßbrücke z. B. in der Kabelmeßtechnik verwendet.

In der Meßbrücke wird das Meßergebnis nicht anhand von Spannung bzw. Strom, sondern durch Vergleich mit bekannten Widerständen ermittelt. Dazu dient die Grundschialtung nach Abb. 10.42.

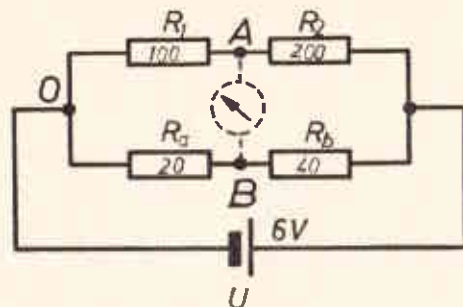


Abb. 10.42 - Prinzipschaltung einer Meßbrücke

An jedem Teilwiderstand dieser Schaltung tritt ein Spannungsabfall auf. Stehen die Widerstände $R_1 : R_2$ im gleichen Verhältnis wie die Widerstände $R_3 : R_4$, so verhalten sich auch die Spannungen $U_1 : U_2$ wie $U_A : U_B$. Die Gesamtspannung wird in beiden Zweigen im gleichen Verhältnis aufgeteilt. In unserer Schaltung liegt also zwischen A und 0 eine gleich große Spannung (2 V) wie zwischen B und 0 (2 V).

Da zwischen den Punkten A und B keine Spannung wirksam ist (Potentialdifferenz = 0!), zeigt ein zwischen A und B geschaltetes Anzeigeelement nichts an. Diesen Zustand bezeichnet man als **Brückenabgleich** oder abgegliche Brücke.

Schalten wir jetzt anstelle des Widerstands R_1 einen Widerstand unbekannter Größe R_x in den oberen Zweig, so muß das Widerstandsverhältnis im unteren Zweig durch einen regelbaren Widerstand R_a so verändert werden, daß das Anzeigeelement keinen Ausschlag zeigt. Wir wissen dann, daß $R_x : R_2 = R_a : R_b$.

Damit jetzt der Widerstandswert R_x bestimmt werden kann, müssen die Widerstandswerte R_2 , R_a und R_b bekannt sein; R_2 bis R_b müssen also genau geeichte Widerstände sein.

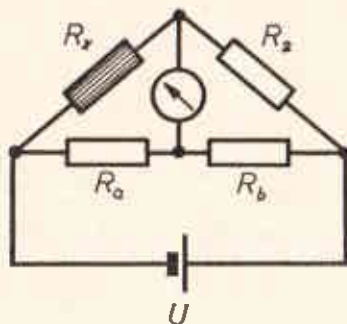


Abb. 10.43 - Meßbrücke

Ist die Brücke abgeglichen, so gilt:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_a}{R_b}$$

Durch Umstellung läßt sich R_x ermitteln:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_a}{R_b}$$

Eine weitere Vereinfachung ist möglich, wenn man anstelle der Widerstände R_a und R_b einen blanken Widerstandsdraht bestimmter Länge verwendet und mit Hilfe eines Schleifkontakts einen veränderbaren Abgriff herstellt (**Schleifdrahtmeßbrücke**).

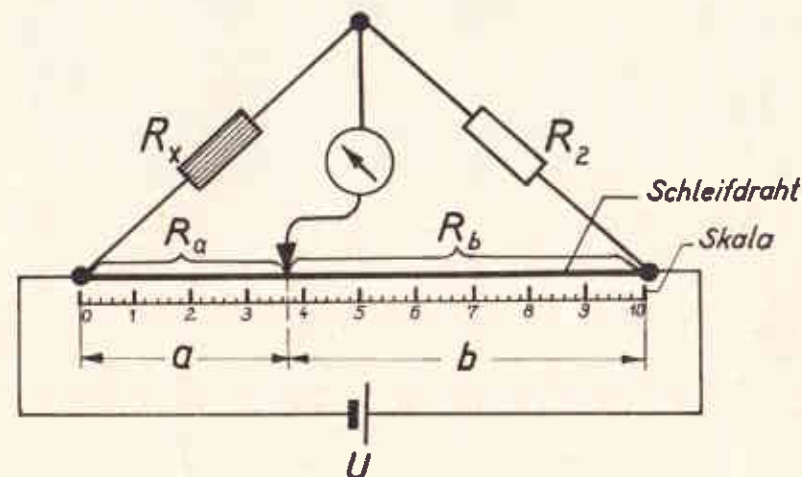


Abb. 10.44 - Schleifdrahtmeßbrücke

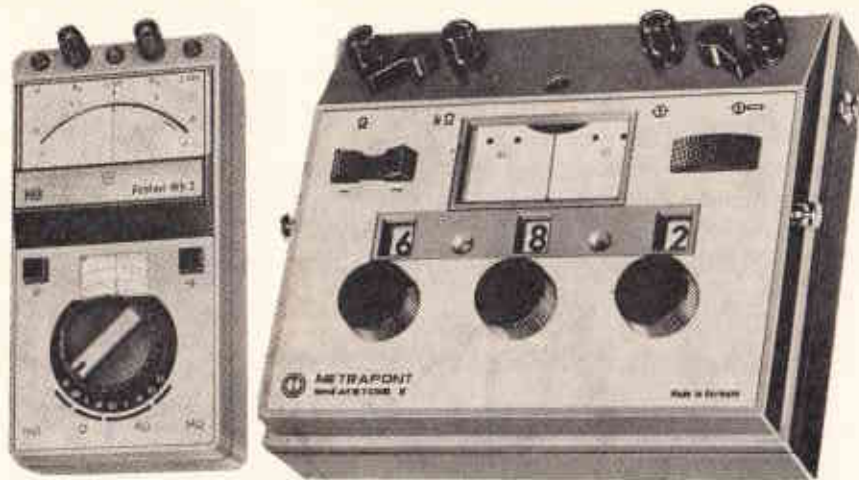
Am Schleifdraht ist eine Längeneinteilung als Skala vorhanden. Schaltet man einen Widerstand R_x unbekannter Größe in die Brücke, so stellt man den Brückenabgleich durch Verschieben des Schleifkontakts her (Anzeige = 0). Dann gilt:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_a}{R_b} = \frac{a}{b}$$

und nach Umstellung:

$$R_x = R_2 \cdot \frac{a}{b} \quad \Omega$$

Da sich bei einem blank gezogenen Widerstandsdraht die Widerstände wie die Drahtlängen verhalten, genügt es also, das Längenverhältnis $a : b$ am Schleifdraht zu ermitteln.



(Werkbild Hartmann & Braun AG)

(Werkbild Metrawatt)

Abb. 10.45 – Brückeninstrumente für Widerstandsmessungen

Vorteile der Meßbrücke: Beim Brückenabgleich liegt am Anzeigeeinstrument keine Spannung bzw. fließt über das Instrument kein Strom. Damit kann das Anzeigeeinstrument keinen Fehler verursachen.

Das Anzeigeeinstrument dient nicht zur Ablesung des Meßwerts. Es braucht daher nicht einmal geeicht zu sein. Für das Anzeigeeinstrument genügt eine hohe Empfindlichkeit (Spannung bzw. keine Spannung).

Daher kann man in Meßbrücken auch Fernhörer als „Anzeigeeinstrument“ verwenden, wenn als Stromquelle ein Tonfrequenzgenerator dient. Ein Fernhörer ist billiger und empfindlicher als z. B. ein Drehspulinstrument. In etwas abgewandelter Form finden Meßbrücken auch zur Messung von Induktivitäten (L-Meßbrücken) oder Kapazitäten (C-Meßbrücken) Verwendung.

10.4.5. Dämpfungsmessung

Unter Dämpfung versteht man in der Fernmeldetechnik den Spannungsverlust auf einem Übertragungswege (Leitung, techn. Einrichtung usw.). Zur Bestimmung der Dämpfung sind daher auch Spannungsmessungen notwendig.

Voraussetzung für eine Dämpfungsmessung ist eine richtige Anpassung (allgemein üblich: 600Ω), die sich auch auf das Dämpfungsmeßinstrument bezieht. Da Dämpfungsmessung = Spannungsmessung ist, kann man sie mit Spannungsmeißinstrumenten vornehmen. Das Dämpfungsmaß (Neper oder Dezibel) beruht jedoch auf logarithmischem Zusammenhang. Soll also eine direkte Dämpfungsmessung ermöglicht werden, so wird die Skala eines entsprechenden Spannungsmessers in Neper oder Dezibel (also logarithmisch) geeicht.

Zur Dämpfungsmessung wird an den Eingang des Übertragungsweiges ein sog. Normalgenerator geschaltet. Der Generator erzeugt eine Wechselspannung von 800 Hz und 0,775 V (Klemmenspannung), wenn ein ohmscher Verbraucherwiderstand von 600Ω anliegt. Er erzeugt damit 1 Milliwatt Wirkleistung. (Man spricht dabei vom Bezugspegel 0 Np bzw. 0 dB.) Ein direkt angeschlossener Dämpfungsmesser ($R_m = 600 \Omega$) würde 0 Np bzw. 0 dB anzeigen. Liegt aber ein Übertragungsweg zwischen Normalgenerator und Dämpfungsmesser, so treten auf ihm Spannungsverluste auf. Der Ausschlag des Dämpfungsmessers ist kleiner. Er zeigt damit eine entsprechende Dämpfung an.

Für den Dämpfungsmesser gilt also:

Großer Zeigerausschlag = kleine Dämpfung,
kleiner Zeigerausschlag = große Dämpfung.

Wegen der Eichung im Dämpfungsmaß kann der Wert auf der Skala direkt abgelesen werden.

10.4.6. Bestimmung von Kapazitäten und Induktivitäten durch indirekte Messungen

Eine unmittelbare Messung von Kapazitäten oder Induktivitäten ist mit entsprechenden Meßbrücken möglich. Im Rahmen dieses Bandes soll aufgezeigt werden, wie solche Messungen mit einfachen Mitteln zumindest annähernd genau ausgeführt werden können.

10.4.6.1. Indirekte Kapazitätsmessung

Der Gleichstromwiderstand eines Kondensators ist so groß, daß er mit üblichen Widerstandsmeßgeräten nicht gemessen werden kann. Wir können also davon ausgehen, daß ein Kondensator nur eine nachweisbare Kapazität besitzt.

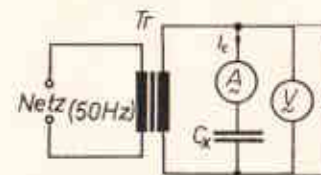


Abb. 10.46 – Indirekte Kapazitätsmessung

Die Kapazität eines Kondensators läßt sich bei Wechselstromspeisung anhand einer Spannungs- und Strommessung bestimmen, wenn die Frequenz des Wechselstroms bekannt ist. Man kann im öffentlichen Stromversorgungsnetz (Verbundnetz) heute ohne weiteres voraussetzen, daß die Frequenz des Netzwechselstroms genau 50 Hz beträgt.

Legt man nach der Schaltung Abb. 10.46 an einen Kondensator eine Wechselspannung ($f = 50 \text{ Hz}$) und mißt die anliegende Wechselspannung und den fließenden Wechselstrom (Blindstrom), so kann die Kapazität aus den Beziehungen

$$X_c = \frac{U_c}{I_c} \text{ und } X_c = \frac{1}{\omega C}$$

bestimmt werden.

Wichtig ist dabei, die Spannungsfestigkeit des Kondensators zu berücksichtigen. Ist die Netzspannung für den Kondensator zu hoch, so kann sie durch einen Transformator herabgesetzt werden.

Beispiel:

Die Kapazität eines Kondensators mit einer Spannungsfestigkeit von 150 V= soll bestimmt werden.

Gegeben: $U_{\max} = 150 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$

Gesucht: C

Lösung: Da der Höchstwert der Betriebsspannung für den Kondensator 150 V beträgt, darf der Effektivwert der angelegten Wechselspannung nur $U_{\text{eff}} = 0,707 \cdot U_{\max} = 0,707 \cdot 150 \text{ V} = 106 \text{ V}$ betragen.

Gewählt wird 100 V_{eff}. Diese Spannung muß durch einen Transformator erzeugt werden. Beim Anschalten des Kondensators werden folgende Werte gemessen ($f = 50 \text{ Hz}$):

$$U_{\sim} = 95 \text{ V}$$

$$I_{\sim} = 45 \text{ mA} = 0,045 \text{ A}$$

Die Rechnung ergibt:

$$X_c = \frac{U_c}{I_c} = \frac{95 \text{ V}}{0,045 \text{ A}} = 2110 \Omega$$

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

$$C = \frac{1}{X_c \cdot \omega}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314$$

$$C = \frac{1}{2110 \cdot 314} = 0,00000151 \text{ F}$$

$$C = \underline{\underline{1,51 \mu\text{F}}}$$

Der Kondensator hat eine Kapazität von 1,51 μF .

10.4.6.2. Indirekte Induktivitätsmessung

Die indirekte Messung der Induktivität einer Spule ist eigentlich nur bei Spulen ohne Eisenkern genau. Da bei Wechselstromspeisung im Eisenkern einer Spule Wirbelstromverluste auftreten, ergibt sich damit zwangsläufig auch ein Meßfehler. Zudem kann sich der Magnetisierungsgrad des Eisenkerns auf die Größe der Induktivität auswirken. Trotzdem läßt sich mit einfachen Mitteln eine wenigstens annähernd genaue Bestimmung der Induktivität durchführen.

Bei Spulen darf der Wirkwiderstand der Wicklungsdrähte auf keinen Fall vernachlässigt werden. Zur Bestimmung der Induktivität sind daher zwei Messungen erforderlich:

a) Gleichstrommessung zur Bestimmung des Wirkwiderstands und

b) Wechselstrommessung zur Bestimmung des Scheinwiderstands der Spule.

Aus beiden Messungen läßt sich dann die Induktivität berechnen. Die Frequenz des Wechselstroms muß bekannt sein.

Beispiel:

An einer Drosselspule werden folgende Messungen vorgenommen:

a) Gleichstrom $U_{\sim} = 60 \text{ V}$; $I_{\sim} = 1,2 \text{ A}$;

b) Wechselstrom $U_{\sim} = 75 \text{ V}$; $I_{\sim} = 0,6 \text{ A}$;
 $f = 50 \text{ Hz}$.

Wie groß ist die Induktivität der Spule?

Gegeben: $U_{\sim} = 60 \text{ V}$; $I_{\sim} = 1,2 \text{ A}$; $U_{\sim} = 75 \text{ V}$; $I_{\sim} = 0,6 \text{ A}$;
 $f = 50 \text{ Hz}$

Gesucht: L

Lösung: $X_L = \omega \cdot L$

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

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

$$Z = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}} = \frac{75 \text{ V}}{0,6 \text{ A}} = 125 \Omega$$

$$R = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}} = \frac{60 \text{ V}}{1,2 \text{ A}} = 50 \Omega$$

$$X_L = \sqrt{125^2 - 50^2} = \sqrt{15600 - 2500}$$

$$X_L = \sqrt{13100} = 114 \Omega$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314$$

$$L = \frac{114}{314} = \underline{\underline{0,363 \text{ H}}}$$

Die Drosselspule hat eine Induktivität von 0,363 H.

11. Transformatoren/Fernmelde- übertrager

11.1. Starkstromtransformatoren

Da ihre Wirkungsweise auf den Vorgängen der Induktion beruht, sind Transformatoren nur für Wechselstrom oder schwankenden Gleichstrom anwendbar. Sie bestehen grundsätzlich aus zwei Wicklungen, die sich auf einem geschlossenen Eisenkern aus Transformatorenblechen befinden.

11.1.1. Verhältnis der Spannungen

In einem Versuch nach Abb. 11.1 soll ermittelt werden, wie hoch die Spannung in der zweiten Wicklung ist, wenn an die erste Spule eine Wechselspannung bestimmter Höhe angelegt wird. Beide Wicklungen (Spulen) werden auf einen gemeinsamen Eisenkern gesteckt, der durch ein Joch geschlossen wird. Zur Verminderung von Wirbelströmen muß der Eisenkern aus Transformatorenblechen zusammengesetzt sein. Die eine Spule mit der Windungszahl N_1 liegt über dem Spannungsteiler R an der Netzwechselspannung 220 Volt, außerdem liegt parallel zur Spule ein Spannungsmesser. Die zweite Spule mit der Windungszahl N_2 wird mit einem zweiten Spannungsmesser verbunden.

Die Spule mit der Windungszahl N_1 liegt im ersten Stromkreis oder im **Primärkreis** (primus = der Erste); sie heißt deshalb auch **Primärspule** oder **Primärwicklung** und die an ihr gemessene Spannung heißt **Primärspannung**, der in ihr fließende Strom **Primärstrom**.

Die Spule mit der Windungszahl N_2 wird als **Sekundärspule** oder **Sekundärwicklung** (sekundus = der Zweite) bezeichnet. Sinngemäß ist hier die Spannung die **Sekundärspannung** und der Strom der **Sekundärstrom**.

Durch den geschlossenen Eisenkern ist ein geschlossener Feldlinienweg hoher magnetischer Leitfähigkeit gegeben. Das ist wichtig, weil für beide Spulen gleiche magnetische Verhältnisse vorhanden sein müssen.

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

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

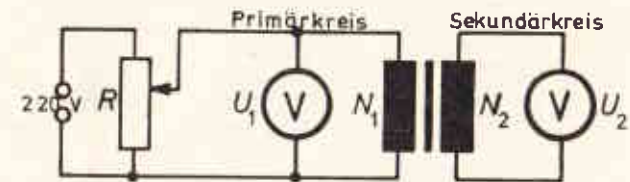
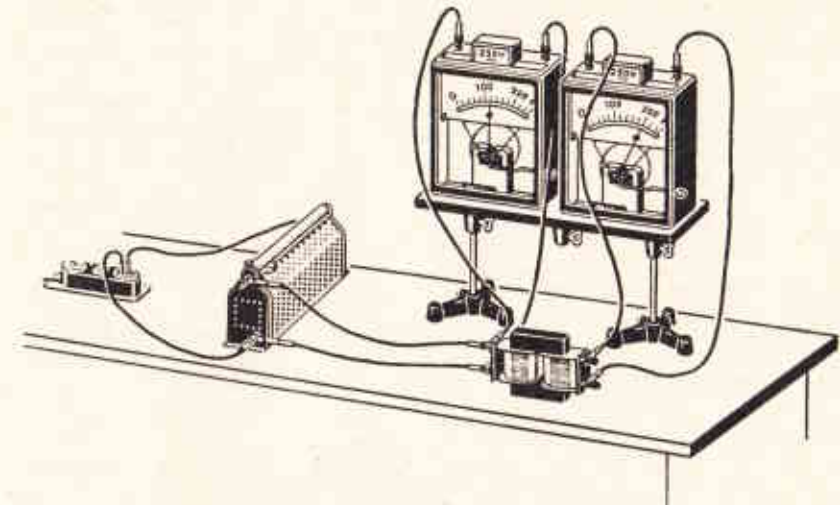


Abb. 11.1 – Das Verhältnis der Spannungen

Wir stellen fest:

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

In eine Formel gebracht, ergibt sich:

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

Die Richtigkeit dieser Formel läßt sich mit Hilfe der im Abschn. 7.2.2 abgeleiteten Formel für die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe beweisen.

Für die Höhe der Selbstinduktionsspannung in der Primärwicklung gilt

$$U_1 = \Phi \cdot N_1 \cdot f \cdot 4,44$$

und für die Höhe der Induktionsspannung in der Sekundärwicklung

$$U_2 = \Phi \cdot N_2 \cdot f \cdot 4,44,$$

Somit beträgt das Verhältnis der Spannungen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\Phi \cdot N_1 \cdot f \cdot 4,44}{\Phi \cdot N_2 \cdot f \cdot 4,44}$$

Da sich beide Wicklungen auf einem gemeinsamen geschlossenen Eisenkern befinden, ändert sich für beide Wicklungen der gleiche magnetische Fluß Φ im Rhythmus der gleichen Frequenz f . Im Bruch auf der rechten Seite der Gleichung können daher Φ , f und 4,44 gekürzt werden. Aus der Gleichung wird dann:

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

11.1.2. Verhältnis der Ströme

Zu Beginn eines jeden Versuchs nach Abb. 11.2 wird der Spannungsteiler auf Null gestellt und die vier Glühlampen fest in die Fassungen eingeschraubt. Wir verwenden die gleichen Spulen wie im Versuch nach Abb. 11.1.

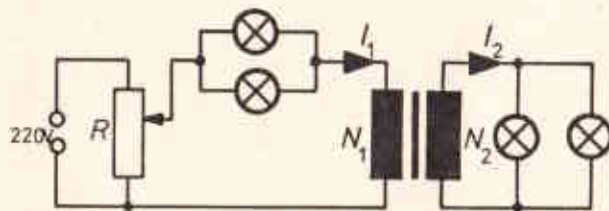
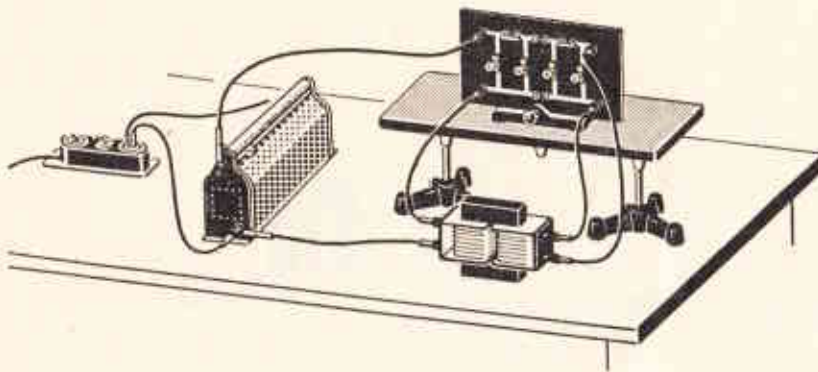


Abb. 11.2 – Verhältnis der Ströme

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

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

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

Der Versuch läßt sich übrigens auch ausreichend genau durchführen, wenn man anstelle der Glühlampen in den Primär- und Sekundärstromkreis je ein Amperemeter (1 A) schaltet und für jedes Übersetzungsverhältnis den Primärstrom auf 0,5 A einstellt.

Unsere Beobachtungen tragen wir in die Tabelle ein:

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

Wir stellen fest:

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

Auf eine Formel gebracht, ergibt sich

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

Auch diese Formel läßt sich mit Hilfe der im Abschn. 7.2.2 gewonnenen Erkenntnisse beweisen.

Da wegen der unmittelbaren Kopplung der beiden Wicklungen die magnetische Induktion B für beide Wicklungen gleich groß ist, gilt:

$$B_1 = B_2$$

B ergibt sich aus $\mu \cdot H$ oder $\mu \cdot \frac{I \cdot N}{l}$.

In die Gleichung eingesetzt, ergibt sich

$$\mu \cdot \frac{I_1 \cdot N_1}{l} = \mu \cdot \frac{I_2 \cdot N_2}{l}$$

Für beide Wicklungen sind aber auch μ und l (gemeinsamer Eisenkern) gleich, so daß beide Seiten der Gleichung durch μ dividiert bzw. mit l multipliziert werden können. Damit wird aus der Gleichung:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$$

Durch Umstellen der Gleichung erhalten wir dann

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

Noch einfacher wird der Beweis, wenn wir davon ausgehen, daß an der Sekundärseite des Transformators – vorausgesetzt, der Wirkungsgrad beträgt 1 – die gleiche Leistung wirksam wird wie an der Primärseite (sie kann nie größer sein!).

Daher gilt:

$$P_1 = P_2$$

$$\text{oder } U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

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

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

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

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

Die beiden für das Verhältnis der Ströme abgeleiteten Formeln gelten jedoch nur, wenn man den Wirkungsgrad eines Transformators mit 1 annimmt. In der Praxis ist der Sekundärstrom immer etwas kleiner als nach diesen Formeln berechnet, da im Transformator Verluste auftreten (vgl. Beispiel unter 11.1.3.)

Als Übersetzungsverhältnis $\bar{u}$ bezeichnet man beim **Starkstromtransformator**

- a) das Verhältnis $\frac{\text{große Windungszahl}}{\text{kleine Windungszahl}}$ oder
- b) das Verhältnis $\frac{\text{große Leerlaufspannung}}{\text{kleine Leerlaufspannung}}$

Das Übersetzungsverhältnis eines **Starkstromtransformators** ist also immer größer oder gleich 1.

1. Beispiel:

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

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

Gesucht: N_2

$$\text{Lösung: } \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad N_2 = \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1} = \frac{230 \text{ V} \cdot 250}{500 \text{ V}} = \underline{\underline{115}}$$

Die Sekundärspule muß 115 Windungen erhalten.

2. Beispiel:

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

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

Gesucht: $\bar{u}$; N_1

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

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

$$N_1 = \frac{N_2 \cdot U_1}{U_2} = \frac{200 \cdot 6000 \text{ V}}{220 \text{ V}} = \underline{\underline{5460}}$$

Das Übersetzungsverhältnis des Transformators beträgt 27,3, die Primärwindungszahl muß 5460 betragen.

11.1.3. Wirkungsgrad eines Transformators

Bei der Erarbeitung der Grundlagen wurde davon ausgegangen, daß Primär- und Sekundärleistung eines Transformators gleich groß sind. Das trifft nicht ganz zu, da jeder Energiewandler Verluste aufweist.

Man muß beim Transformator im wesentlichen 4 Arten von Verlusten unterscheiden:

- Wirbelstromverluste** (verursacht durch die Änderung des magnetischen Flusses im Eisenkern),
- Ummagnetisierungsverluste** (bedingt durch die Hysterese des Eisenkerns. Je größer die Koerzitivfeldstärke des Eisens, desto größer sind die Ummagnetisierungsverluste),
- Kupferverluste** (Die Kupferleiter der Wicklung besitzen einen Wirkwiderstand. Bei Stromdurchgang treten Energieverluste auf.) und
- Streuverluste** (Die magnetischen Feldlinien verlaufen nicht alle im Eisenkern. Ein Teil dieser Feldlinien streut außerhalb des Eisenkerns und geht für den beabsichtigten Induktionsvorgang verloren.)

Durch besondere Konstruktionsmerkmale lassen sich die Verluste mehr oder weniger verringern. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten:

- Wirbelstromverluste werden durch möglichst feine Unterteilung des Eisenkerns in dünne sog. Transformatorenbleche und gute Isolierung der einzelnen Bleche voneinander verringert.
- Ummagnetisierungsverluste sind wegen ihrer Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke materialbedingt. Für Transformatoren werden daher seit langem speziallegierte Eisenbleche mit sehr schmaler Hysterese hergestellt.
- Kupferverluste können durch Verringerung des Wicklungswiderstands klein gehalten werden. Das bedingt die Verwendung von Leitermaterial hoher Leitfähigkeit (Elektrolytkupfer) und möglichst großen Querschnitts. Zur besseren Ausnutzung des Wicklungsraumes werden daher vor allem bei größeren Transformatoren Drähte mit rechteckigem oder quadratischem Querschnitt verwendet.
- Streuverluste lassen sich durch besondere Bauarten und Wicklungsanordnungen im Transformator verringern.

Die Verluste (außer Streuverluste) äußern sich in Form von Wärme.

Diese Wärme muß wegen der Wärmeempfindlichkeit der Leiterisolierung abgeführt werden. Das kann man durch geeignete Montage des Transformators (freier Luftzutritt und Luftzirkulation) oder durch besondere Luftkühlung oder Ölkühlung erreichen. Großtransformatoren werden heute fast ausschließlich durch Öl gekühlt.

Wegen der Verluste besitzt der Transformator einen Wirkungsgrad < 1 . Dieser beträgt etwa 0,85 bis 0,95. Zur Bestimmung des Transformatorwirkungsgrads bedient man sich der üblichen Wirkungsgradformel:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_2}{P_1}$$

Unter der Nennleistung eines Transformators versteht man die an der Sekundärseite entnehmbare Leistung. Bei mehreren Sekundärwicklungen ist die Nennleistung gleich der Summe der Leistungen, die den einzelnen Sekundärwicklungen entnommen werden können. Die Nennleistung wird in der Maßeinheit der Scheinleistung – also in VA – angegeben, da die Scheinleistung die größte Leistung bei Wechselstrom ist. Die aufgenommene Leistung (Primärleistung) ist dem Wirkungsgrad entsprechend immer etwas größer als die Nennleistung.

Beispiel:

Ein Netztransformator für 220 V besitzt zwei Sekundärwicklungen: a) 250 V, 100 mA; b) 6,3 V, 5 A. Der Transformatorwirkungsgrad beträgt 0,9. Wie groß sind Nennleistung, Primärleistung und Stromaufnahme des Transformators?

Gegeben: $U_1 = 220 \text{ V}$; $U_{21} = 250 \text{ V}$; $I_{21} = 100 \text{ mA}$;
 $U_{22} = 6,3 \text{ V}$; $I_{22} = 5 \text{ A}$; $\eta = 0,9$

Gesucht: S_2 ; S_1 ; I_1

Lösung: a) $S_2 = S_{21} + S_{22}$
 $S_{21} = U_{21} \cdot I_{21}$
 $= 250 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A} = \underline{25 \text{ VA}}$
 $S_{22} = U_{22} \cdot I_{22}$
 $= 6,3 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = \underline{31,5 \text{ VA}}$
 $S_2 = 25 \text{ VA} + 31,5 \text{ VA} = \underline{56,5 \text{ VA}}$

Die Nennleistung beträgt 56,5 VA

b) $\eta = \frac{S_2}{S_1}$
 $S_1 = \frac{S_2}{\eta}$
 $S_1 = \frac{56,5 \text{ VA}}{0,9} = \underline{62,8 \text{ VA}}$

Der Transformator nimmt eine Leistung von 62,8 VA auf.

c) $S_1 = U_1 \cdot I_1$
 $I_1 = \frac{S_1}{U_1}$
 $I_1 = \frac{62,8 \text{ VA}}{220 \text{ V}} = \underline{0,285 \text{ A}}$

Die Stromaufnahme des Transformators beträgt 0,285 A.

11.1.4. Berechnung des erforderlichen Eisenquerschnitts

Da mit zunehmender Belastung des Transformators aufgrund der Beziehung $\Theta = I \cdot N$ die Sättigung des Eisenkerns größer wird, muß man den Eisenquerschnitt der Nennleistung anpassen. Mit zunehmender Sättigung wird die erreichbare Änderung des magnetischen Flusses geringer und der Wirkungsgrad des Transformators schlechter. Für die Praxis reicht eine Faustformel zur Bestimmung des erforderlichen Eisenquerschnitts aus:

$$A_{Fe} = \sqrt{S_1}$$

In dieser Formel bedeuten:

A_{Fe} = Eisenquerschnitt in cm^2 und

S_1 = maximale Scheinleistungsaufnahme des Trafos in VA.

Der Eisenquerschnitt muß also der Wurzel aus der Primärleistung entsprechen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich hier um eine stark vereinfachte Formel handelt, die sich physikalisch nicht ohne weiteres ableiten läßt. Für die Praxis hat diese Faustformel insofern Wert, als man mit ihr in etwa die zulässige Nennleistung eines Transformators bestimmen kann.

Beispiel:

Welche Leistung kann einem Transformator mit einem Eisenquerschnitt von 15 cm^2 entnommen werden?

Geschätzter Wirkungsgrad 0,95.

Gegeben: $A_{Fe} = 15 \text{ cm}^2$; $\eta = 0,95$

Gesucht: S_2

Lösung: $\eta = \frac{S_2}{S_1}$
 $S_2 = \eta \cdot S_1$
 $S_1 = A_{Fe}^2$
 $= 15^2 = \underline{225 \text{ VA}}$
 $S_2 = 0,95 \cdot 225 = \underline{214 \text{ VA}}$

Dem Transformator darf eine Leistung (Nennleistung) von 214 VA entnommen werden.

11.1.5. Berechnung der Windungszahlen

Soll ein Transformator neu gewickelt werden, so kann man sich zur Bestimmung der Windungszahlen ebenfalls – wie bei der Bestimmung des erforderlichen Eisenquerschnitts – vereinfachter Formeln bedienen. Die folgenden Formeln sind aus der Induktionsformel $U = \Phi \cdot N \cdot f \cdot 4,44$ für die Netzfrequenz 50 Hz und eine magnetische Induktion von maximal etwa 1,1 Tesla entwickelt worden:

$$N_1 = \frac{40 \cdot U_1}{A_{Fe}} \quad \text{wobei}$$

$$N_2 = \frac{42 \cdot U_2}{A_{Fe}}$$

N_1 = Primärwindungszahl,
 N_2 = Sekundärwindungszahl,
 U_1 = Primärspannung in V,
 U_2 = Sekundärspannung in V,
 A_{Fe} = Eisenquerschnitt in cm^2 .

Diese Formeln sind zur Windungszahlenberechnung für Transformatoren bis zu einer Nennleistung von etwa 250 VA ausreichend genau. Für diese Transformatoren

kleiner Nennleistung wird im allgemeinen die Sekundärwindungszahl um 5% größer gewählt als nach dem Übersetzungsverhältnis erforderlich. Dadurch werden die bei Transformatoren kleinerer Nennleistung stärker ins Gewicht fallenden Spannungsverluste zum größten Teil ausgeglichen.

Beispiel:

Für einen Transistorverstärker soll ein Netztransformator gewickelt werden. Der Verstärker soll an 220 V/50 Hz betrieben werden und benötigt 24 V/2 A. Geschätzter Wirkungsgrad 0,85. Wieviel Windungen müssen Primär- und Sekundärwicklung erhalten?

Gegeben: $U_1 = 220 \text{ V/50 Hz}$; $U_2 = 24 \text{ V}$; $I_2 = 2 \text{ A}$; $\eta = 0,85$

Gesucht: N_1 ; N_2

Lösung: $N_1 = \frac{40 \cdot U_1}{A_{Fe}}$

$$A_{Fe} = \sqrt{S_1}$$

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$S_2 = 24 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} = 48 \text{ VA}$$

$$S_1 = \frac{48 \text{ VA}}{0,85} = 56,5 \text{ VA}$$

$$A_{Fe} = \sqrt{56,5} = 7,52 \text{ cm}^2, \text{ gewählt } 8 \text{ cm}^2$$

$$N_1 = \frac{40 \cdot 220}{8} = \underline{\underline{1100}}$$

$$N_2 = \frac{42 \cdot U_2}{A_{Fe}}$$

$$N_2 = \frac{42 \cdot 24}{8} = \underline{\underline{126}}$$

Der Transformator muß 1100 Windungen als Primärwicklung und 126 Windungen als Sekundärwicklung erhalten.

Den erforderlichen Drahtquerschnitt kann man anhand der zulässigen Stromdichte S bestimmen. Die Stromdichte darf bei kleineren Transformatoren zwischen etwa $2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ für 250 VA und $4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ für 10 VA betragen.

Für das obige Beispiel ergeben sich demnach folgende Drahtquerschnitte bei einer Stromdichte von $3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$:

$$S = \frac{I}{A}$$

$$A = \frac{I}{S}$$

$$A_1 = \frac{I_1}{S} = \frac{0,257}{3} = 0,0856 \approx \underline{\underline{0,09 \text{ mm}}}$$

$$A_2 = \frac{I_2}{S} = \frac{2}{3} = 0,667 \approx \underline{\underline{0,7 \text{ mm}}}$$

11.1.6. Anwendung von Transformatoren

Wegen der induktiven Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung besitzt der Wechselstrom auf der Sekundärseite die gleiche Frequenz wie der Primärstrom. Da die öffentlichen Stromversorgungsnetze heute ausschließlich mit Wechsel- bzw. Drehstrom betrieben werden und die Stromversorgung der Fernmeldeanlagen weitgehend aus dem öffentlichen Netz sichergestellt wird, enthalten die Stromversorgungseinrichtungen der Fernmeldeanlagen ohne Ausnahme Transformatoren.

Man kann dem Transformator in der Stromversorgungstechnik grundsätzlich drei Hauptaufgaben zuschreiben:

- Spannungen bzw. Ströme herauf- oder heruntertransformieren,**
- galvanisches Trennen des Verbraucherstromkreises vom Netz (Schutztransformator) und**
- Einsatz als Meßwandler, d. h. zur Anpassung von Meßinstrumenten an die Meßgröße.**

11.1.6.1. Schutztransformator

Neben den Netztransformatoren, die zur Umsetzung von Spannungen oder Strömen dienen, gibt es Starkstromtransformatoren, deren Übersetzung unter Umständen 1:1 betragen kann. Solche Transformatoren werden als sog. Schutztransformatoren eingesetzt. Sie sollen den Verbraucherstromkreis galvanisch vom Versorgungsnetz trennen. Da die öffentlichen Versorgungsnetze geerdet sind, besteht die Gefahr, daß es bei Berührung nur eines spannungsführenden Anlagenteils zu Unfällen kommt, wenn man auf elektrisch leitendem Boden steht.

An der Sekundärseite eines Schutztransformators darf nach VDE-Bestimmungen keine Leitung geerdet werden, so daß die Berührung einer Leitung nicht so gefährlich ist. Schutztransformatoren werden in Stromversorgungsanlagen eingesetzt, bei denen eine zufällige Berührung von spannungsführenden Teilen durch das Bedienungspersonal nicht ausgeschlossen ist. Das trifft zum Beispiel auch für die Reparatur von Fernmeldegeräten zu, wenn diese nur im Betriebszustand durchgemessen werden können.

11.1.6.2. Spartransformator

Eine besondere Bauart ist der sog. Spartransformator. Er arbeitet als induktiver Spannungsteiler.

Die Primärwicklung wird angezapft, so daß ein Teil gleichzeitig als Sekundärwicklung dient. Damit wird an der Wicklung gespart. Da bei Spartransformatoren Primär- und Sekundärwicklung jedoch nicht galvanisch getrennt sind, werden sie in Stromversorgungsanlagen der Fernmeldetechnik nicht eingesetzt (**gefährlich!**). Spartransformatoren werden für Anwendungen in der Starkstromtechnik nur mit einem Übersetzungsverhältnis zwischen 1:1 und 1:2 hergestellt.

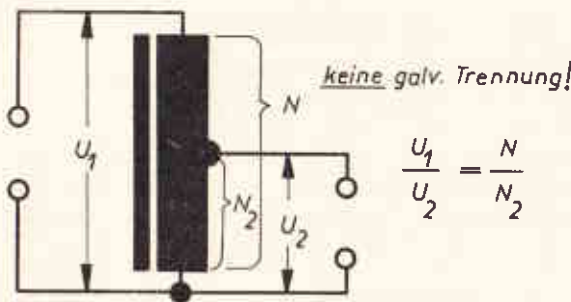


Abb. 11.3 – Spartransformator

11.1.6.3. Meßwandler

In Hochspannungsanlagen können die Spannungen und Stromstärken wegen ihrer Höhe nicht direkt gemessen werden. Man schaltet deshalb, um die hohen Spannungen von den Meßgeräten fernzuhalten, vor die Meßgeräte sog. Spannungs- bzw. Stromwandler; hier werden die hohen Spannungen heruntertransformiert. Der Spannungswandler ist ein Transformator, der mit seiner Oberspannungswicklung (Primärwicklung) an die Hochspannung und mit seiner Unterspannungswicklung (Sekundärwicklung) an das Meßgerät angeschlossen wird.

Der Stromwandler ist ebenfalls ein Transformator, der mit seiner Primärwicklung in die Hochspannungsleitung eingeschleift wird. Die Primärwicklung hat nur wenige Windungen aus dickem Draht, die Sekundärwicklung dagegen eine größere Anzahl Windungen. Beim Stromwandler wird also die Stromstärke heruntertransformiert. Diese kann nun mit einem Meßinstrument gemessen werden.

11.1.6.4. Transformatoren für Drehstrom

Drehstrom, der aus miteinander verketteten Wechselströmen besteht, kann man durch drei voneinander getrennte, gleichartige Einphasen-Wechselstromtransformatoren ebenfalls in höhere oder niedrigere Spannungen umwandeln. Zu diesem Zweck werden deren Primär- und Sekundärwicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung miteinander verbunden. In der Praxis werden aber für den Drehstromtransformator die drei Kerne zu einem einzigen vereinigt. Die Wicklungen können dabei im Stern oder Dreieck geschaltet sein. Es können auf der Primärseite und auf der Sekundärseite verschiedene Schaltarten angewendet werden. Für die Berechnung der Übersetzungsverhältnisse sowie der Strom- und Spannungsverhältnisse von Drehstromtransformatoren gelten die Regeln wie für Einphasen-Transformatoren.

11.2. Übertrager in der Fernmeldetechnik

11.2.1. Anwendung des Übertragers

Zum Unterschied gegenüber seiner Anwendung auf dem Gebiet der Stromversorgung bezeichnet man den Transformator in der Fernmeldetechnik als Übertrager. Der Übertrager übernimmt in der Fernmeldetechnik

besondere Aufgaben und unterscheidet sich daher auch in einigen Konstruktionsmerkmalen vom Starkstromtransformator.

Die hauptsächlichen Anwendungsgebiete des Übertragers sind:

Anpassung: Um die in der Fernmeldetechnik üblichen geringen Energiemengen möglichst verlustlos vom Sender zum Empfänger übertragen zu können, ist eine genaue Anpassung aller Übertragungsmittel in bezug auf den Widerstand erforderlich. Anpassung heißt, daß der Abschlußwiderstand genauso groß sein muß wie der Widerstand der Energiequelle. Soll z. B. ein Lautsprecher mit 5Ω an einen Röhrenverstärker mit $R_i = 10000 \Omega$ angepaßt werden, so ist das mit Hilfe eines Übertragers möglich, dessen Widerstands-Übersetzungsverhältnis 2000:1 beträgt.

Galvanische Trennung von Stromkreisen: Auf Kabel- oder Freileitungsstrecken können z. B. infolge Beeinflussung durch benachbarte Starkstrom- oder Hochspannungslinien unerwünscht hohe Spannungen auftreten. Um diese unter Umständen gefährlichen Spannungen von den technischen Einrichtungen fernzuhalten, werden solche Leitungen durch Übertrager abgeschlossen. Die Übertrager müssen daher hochspannungssicher aufgebaut sein. Weiterhin trennen Übertrager die Leitungen gleichstrommäßig von den Amtseinrichtungen, denn sie können nur Wechselströme übertragen. Damit gelangen nur die Nachrichtenwechselströme von den Amtseinrichtungen auf die Fernleitungen. Der zum Betrieb von Fernmeldeeinrichtungen benötigte Gleichstrom bleibt auf die Amtseinrichtungen oder Ortsstromkreise beschränkt.

Mehrfachausnutzung von Leitungen (Phantomschaltung): Dabei werden zwei Doppelleitungen mit Hilfe von Übertragern zu sog. Vierern zusammengeschaltet. Auf diese Weise erhält man aus zwei Doppelleitungen drei Übertragungswege.

11.2.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Übertragers

Den Anwendungsgebieten entsprechend muß der Übertrager besondere Konstruktionsmerkmale aufweisen.

Da Nachrichtenwechselströme eine höhere Frequenz aufweisen als der technische Wechselstrom (50 Hz), treten wegen der schnelleren Änderung des magnetischen Flusses im Eisenkern auch höhere Wirbelstromverluste auf. Zur Verminderung dieser Wirbelstromverluste müssen die Transformatorbleche noch erheblich feiner unterteilt werden als beim Starkstromtransformator.

Die Eisenkerne der Übertrager werden heute meistens schon als Ferrit- oder Massekerne hergestellt. Das sind gepreßte Kerne mit sehr geringen Wirbelstromverlusten.

Da in technischen Einrichtungen und Ortsstromkreisen meistens mit Gleichstromspeisung gearbeitet wird, würde der Eisenkern des Übertragers durch den Gleichstrom unter Umständen ziemlich stark vormagnetisiert. Um dem entgegenzuwirken, erhalten die Eisenkerne der Übertrager meistens einen Luftspalt. Er verhindert mit seinem größeren magnetischen Widerstand (geringe Permeabilität) eine vorzeitige Sättigung des Eisenkerns. Vielfach wird heute zwischen die Stoßfugen ein flaches Stück Isolierstoff gelegt.

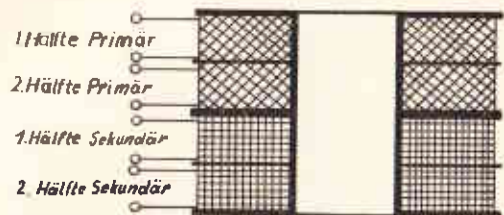
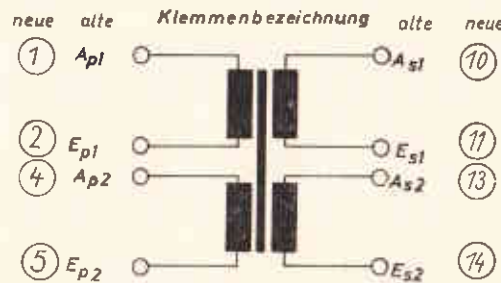


Abb. 11.4 – Kammerwicklung bei einem Übertrager
(Wickelkörper mit 4 gleichgroßen Kammern)

wäre mit einer einfachen Zylinderwicklung nicht möglich, da die äußere Wicklung wegen des größeren Windungsdurchmessers einen größeren Widerstand besäße. Aus diesem Grunde wird der Übertrager entweder als Kerntransformator gebaut, bei dem je eine Wicklungshälfte auf je einem Schenkel des Eisenkerns untergebracht wird, oder man bringt die Spulenkörper in der Anordnung nach Abb. 11.4 an.

Die Wicklungsabschlüsse tragen auf den Übertragern bestimmte Bezeichnungen, die in Abb. 11.5 angegeben sind.



A = Anfang, E = Ende, P = Primär, S = Sekundärwicklung

Abb. 11.5 – Klemmenbezeichnung beim Leitungsübertrager

Um den Übertrager hochspannungssicher zu machen, sind die Wicklungen besonders sorgfältig isoliert.

11.2.3. Das Übersetzungsverhältnis des Übertragers

Im Gegensatz zum Starkstromtransformator bezieht sich das Übersetzungsverhältnis des **Fernmeldeübertragers** nicht auf die Windungszahlen oder das Spannungsverhältnis, sondern auf das **Verhältnis der Schein- oder Wellenwiderstände**. Dabei können wir zunächst Scheinwiderstand = Wellenwiderstand setzen. Der Zusammenhang zwischen dem Windungszahlen- und Widerstandsübersetzungsverhältnis wird anhand der Abb. 11.6 abgeleitet.

Wir wählen dazu einen Transformator mit einer Primärwindungszahl von 200 und einer Sekundärwindungszahl von 100 Windungen. Legen wir an die Primärwicklung

Um den Übertrager für Phantomschaltungen verwenden zu können, müssen Primär- und Sekundärwicklung je in zwei elektrisch genau gleiche Wicklungshälften unterteilt werden. Dabei müssen Windungszahl, Drahtwiderstand, Wicklungsinduktivität und Wicklungskapazität für jede Wicklungshälfte einer Seite genau übereinstimmen. Absolute Wicklungssymmetrie

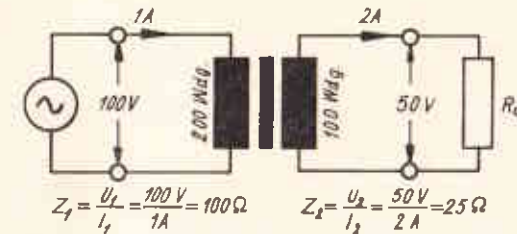


Abb. 11.6 – Windungszahl- und Widerstandsübersetzungsverhältnis

Aus dem Verhältnis Spannung durch Strom können wir den Eingangsscheinwiderstand Z_1 und den Ausgangsscheinwiderstand Z_2 des Transformators errechnen.

Die Rechnung ergibt:

$$\text{Eingangsscheinwiderstand } Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 100 \Omega$$

$$\text{Ausgangsscheinwiderstand } Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{50 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 25 \Omega$$

Jetzt wollen wir vergleichen, wie sich die Windungszahlen und die Scheinwiderstände ein und desselben Transformators verhalten:

$$\text{Windungszahlen } \ddot{u}_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{100} = \frac{2}{1} = 2$$

$$\text{Scheinwiderstände } \ddot{u}_Z = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{100}{25} = \frac{4}{1} = 4$$

Daraus folgt:

Bei einem Übertrager ist das Übersetzungsverhältnis der Widerstände $\ddot{u}_Z$ gleich dem Quadrat des Windungszahlenverhältnisses $\ddot{u}_N$.

In eine Formel gebracht ergibt sich:

$$\frac{N_1^2}{N_2^2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{bzw.} \quad \ddot{u}_N^2 = \ddot{u}_Z$$

Beispiel:

Ein Übertrager hat eine Primärwindungszahl von 1550 und eine Sekundärwindungszahl von 1000. Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis der Scheinwiderstände?

Gegeben: $N_1 = 1550$; $N_2 = 1000$

Gesucht: $\ddot{u}_Z$

$$\begin{aligned}
 \text{Lösung: } \dot{u}_S &= u_E \\
 \dot{u}_S &= \frac{N_1}{N_2} \\
 &= \frac{1550}{1000} = 1,55 \\
 \dot{u}_Z &= 1,55^2 = 2,4
 \end{aligned}$$

Der Übertrager besitzt ein Übersetzungsverhältnis der Scheinwiderstände von 2,4:1.

Bei der Angabe des Übersetzungsverhältnisses von Fernmeldeübertragern wird immer die Primärseite zuerst genannt. Folgende Übersetzungsverhältnisse sind gebräuchlich:

Übersetzungsverhältnis	Scheinwiderstände (Wellenwiderstände bei 800 Hz)	
	Primärseite	Sekundärseite
P : S		
1 : 1	800 Ω	800 Ω
1 : 2	800 Ω	1600 Ω
2 : 1	800 Ω	400 Ω
2,4 : 1	1440 Ω	600 Ω
4,8 : 1	1440 Ω	300 Ω

Aus der Tabelle ist eindeutig erkennbar, daß bei einem Übertrager Primär- und Sekundärseite nicht einfach vertauscht werden dürfen. Man kann also nicht einfach anstelle eines Übertragers 2:1 einen mit dem Übersetzungsverhältnis 1:2 einsetzen, indem man Primär- und Sekundärseite entsprechend tauscht. Das würde erhebliche Anpassungsfehler ergeben.

Für den praktischen Einsatz ist ferner wichtig, daß die Primärseite eines Übertragers immer an der Amtsseite (technische Einrichtung) liegt und die Leitung mit der Sekundärseite verbunden wird.

11.2.4. Induktionsspule

Auch die Induktionsspule stellt ihrem Aufbau nach einen Übertrager dar. Sie ist Bestandteil eines Fernsprechapparats und übernimmt hier im wesentlichen zwei Aufgaben:

Galvanische Trennung: Im Mikrofonstromkreis einer Fernsprechverbindung fließt Gleichstrom, der durch das Mikrofon beim Besprechen „moduliert“ wird. Das Ergebnis ist mit Wechselstrom überlagert Gleichstrom. Die Primärwicklung der Induktionsspule liegt im Mikrofonstromkreis, während an der Sekundärwicklung der Fernhörer liegt. Die Induktionsspule trennt den Wechselstrom vom Gleichstrom, so daß nur der Wechselstromanteil zum Fernhörer gelangt.

Rückhördämpfung: Das ist eine Schaltung, die verhindern soll, daß die Sprechwechselströme aus dem Mikrofon in zu großem Anteil in den eigenen Fernhörer gelangen. Zur Rückhördämpfungsschaltung gehören auch ohmsche Widerstände, die ebenfalls Teil der Wicklung der Induktionsspule sind: Bifilarwicklung!

Zur Vermeidung einer zu starken Gleichstromvormagnetisierung wird auch der Eisenkern der Induktionsspule mit einem Luftspalt im Eisenkern versehen.

12. Elektrische Maschinen

12.1. Generatoren

Bei einer elektrischen Maschine ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- a) einem feststehenden Teil, dem Ständer oder Stator, und
- b) einem sich drehenden Teil, dem Anker oder Rotor (auch Läufer genannt).

Normalerweise ist das äußere Gehäuse der feststehende Teil einer Maschine. Bei Antrieben für elektroakustische Geräte findet man dagegen auch sog. Außenläufermaschinen, bei denen der Innenteil mit der Welle feststeht und das äußere zylindrische Gehäuse einschl. Wicklung sich dreht. Das ergibt den Vorteil, daß man hierbei die größere Schwungmasse des Außenläufers ausnutzen kann, um eine größere Laufgenauigkeit zu erzielen.

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm infolge Änderung des magnetischen Flusses eine Induktionsspannung erzeugt. Wie bereits im Abschn. 7.2.4 dieses Bandes festgestellt worden ist, hängt die **Höhe der Induktionsspannung** ab von

- a) der **Geschwindigkeit**, mit der der Leiter im Magnetfeld bewegt wird,
- b) der **Länge des Leiters** innerhalb des Magnetfeldes, also der wirksamen Leiterlänge (sie steigt mit der Windungszahl) und
- c) der **Stärke des Magnetfeldes**, also der magnetischen Induktion.

Die **Richtung der Induktionsspannung** bzw. des Induktionsstroms läßt sich anhand der **Rechten-Hand-Regel** bestimmen. Diese Rechte-Hand-Regel wird – da sie bei Generatoren anwendbar ist – auch als Generatorregel bezeichnet. Grundsätzlich ist es einerlei, ob der Leiter im feststehenden Magnetfeld bewegt wird oder ob der Leiter feststeht und das Magnetfeld bewegt wird.

Verwendet man anstelle eines geraden Leiters eine drehbar gelagerte Schleife oder gar Spule mit vielen Windungen, so wird bei ihrer Drehung auch eine entsprechend höhere Induktionsspannung erzeugt. Ist das Magnetfeld, in dem sich die Spule dreht, homogen, und wird die Spule gleichmäßig bewegt, so wird eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt. Um die in der gedrehten Leiterschleife (Spule) induzierte Spannung abzugreifen, endet die Wicklung an zwei Schleifringen, auf denen Kohlebürsten schleifen. Die Kohlebürsten sollen den schnellen Abrieb der Schleifringe verhindern. Nur in Kleinmaschinen werden hin und wieder Metallbürsten eingebaut.

Die einfachste Anordnung eines Generators ist der Wechselstromgenerator.

12.1.1. Wechselstromgeneratoren

Zur Erzeugung des Magnetfeldes in Generatoren größerer Leistung sind Dauermagnete zu aufwendig, da große Dauermagnete schwierig in der Herstellung und sehr teuer sind. Hinzu kommt, daß man die Stärke des Magnetfeldes bei einem Dauermagneten nicht regeln kann (was aber bei Generatoren erwünscht ist). **Daher werden bei Generatoren Elektromagnete verwendet.** Zur Speisung dieser Elektromagnete benötigt man Gleichstrom, der meistens durch eine auf der Welle des Wechselstromgenerators montierte sog. Erregermaschine erzeugt wird. Die Erregermaschine muß ein Gleichstromgenerator sein. Man bezeichnet die zur Erzeugung des Magnetfeldes vorhandene Wicklung einer elektrischen Maschine als **Erregerwicklung**, den durch sie fließenden Strom als Erregerstrom. Die für die Erregerwicklung benötigte elektrische Leistung beträgt etwa 1 bis 2% der Maschinenleistung.

Da es zur Erzeugung einer Spannung einerlei ist, ob sich ein Leiter im Magnetfeld oder ein Magnetfeld bewegt, während der Leiter feststeht, gibt es zwei grundsätzliche Bauarten von elektrischen Maschinen:

- die **Außenpolmaschine**, bei der das Magnetfeld im Stator erzeugt wird, und
- die **Innenpolmaschine**, bei der das Magnetfeld im Rotor erzeugt wird.

Zum besseren Verständnis sind Außenpol- und Innenpolmaschine in Abb. 12.1 und 12.2 schematisch dargestellt worden. Die beiden Bauarten werden sowohl für Generatoren als auch für Motoren angewendet; denn Generator und Motor unterscheiden sich grundsätzlich bis auf wenige Ausnahmen (Kurzschlußläufer-Motor) nicht voneinander.

Bei der Erzeugung von Wechselströmen höherer Spannung und größerer Stromstärken ist die Beanspruchung der Schleifringe und Kohlebürsten – die ja zur Ableitung des im Rotor erzeugten Wechselstroms dienen – zu groß. Aus diesem Grunde werden größere Generatoren als Innenpolmaschinen hergestellt.

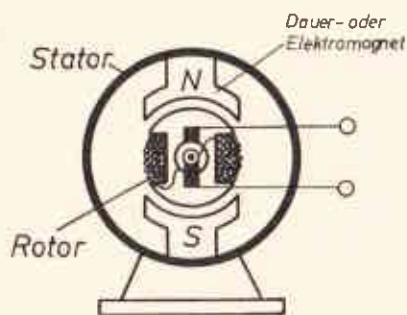


Abb. 12.1 – Außenpolmaschine
(schematisch)

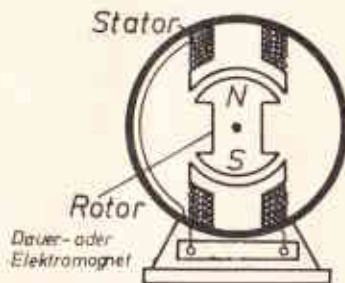


Abb. 12.2 – Innenpolmaschine
(schematisch)

Das Magnetfeld wird beim Innenpolgenerator im Rotor aufgebaut, so daß der im Stator erzeugte Strom über feste Verbindungen, die Anschlußklemmen, abgenommen werden kann. Der erforderliche Erregerstrom ist wesentlich niedriger als der im Generator erzeugte Wechselstrom (erforderliche Erregerleistung etwa 1 bis 2% der Maschinenleistung).

Die Belastung der Schleifringe und Kohlebürsten durch den Erregerstrom ist gering.

12.1.1.1. Kurbelinduktor

Zur Erzeugung der Rufwechselspannung wird in Fernsprechapparaten mit OB-Betrieb (OB = Ortstatterie) der Kurbelinduktor verwendet. Das Magnetfeld wird bei ihm durch einen oder mehrere Hufeisenmagnete gebildet. Zwischen seinen Polschuhen ist ein Doppel-T-Anker angeordnet. Der Eisenkern des Doppel-T-Ankers wird aus dünnen, voneinander isolierten Dynamoblechen zusammengesetzt, um die Wirbelstrombildung zu unterdrücken. Auf den Anker ist die Spule gewickelt.

Der Kurbelinduktor wird mit Hilfe einer Kurbel von Hand betrieben. Zur Erzielung einer größeren Drehzahl ist er mit einem Zahnradantrieb versehen. Bedingt durch die Form des Doppel-T-Ankers geben die Kurbelinduktoren älterer Bauart keine sinusförmige Wechselspannung ab. Die Anker moderner Kurbelinduktoren haben zylindrische Form und ergeben einen sinusförmigen Spannungsverlauf bei gleichmäßiger Drehung. In den Kurbelinduktoren neuerer Ausführung wird bei 3 Kurbelumdrehungen pro Sekunde eine Wechselspannung von etwa 70 Volt erzeugt. Die Frequenz beträgt bei der üblichen Zahnradübersetzung von 1:7 ($3 \cdot 7 = 21$ Ankerumdrehungen pro Sekunde) 21 Hz. Damit der Kurbelinduktor mit seiner Wicklung keinen Nebenschluß für die Sprechwechselströme darstellt, wird er erst bei Betätigung der Kurbel durch einen Kontakt eingeschaltet.

12.1.2. Drehstromerzeugung

Werden in einem Wechselstromgenerator nicht nur eine, sondern drei um je 120° versetzte Schleifen oder Wicklungen angeordnet, so werden 3 verschiedene Wechselspannungen erzeugt, die um 120° phasenverschoben sind. Ein solcher Generator liefert somit Dreiphasen-Wechselstrom oder Drehstrom. Die wichtigsten Grundlagen über die Erzeugung und die

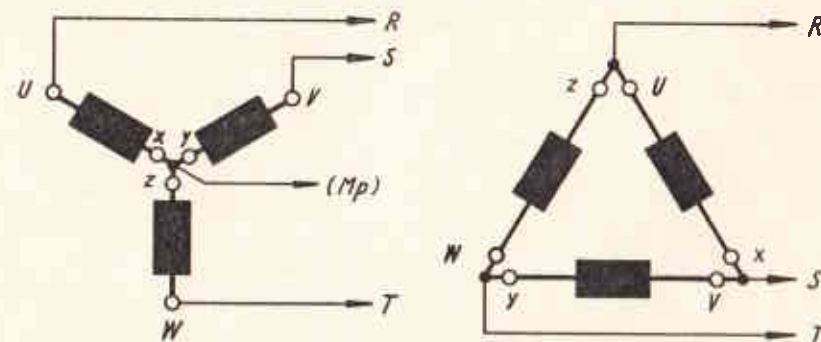


Abb. 12.3 – Sternschaltung und Dreieckschaltung

Eigenschaften des Drehstroms sind bereits im Abschn. 8.3 behandelt worden.

Aufgrund der Eigenschaft, daß beim Drehstrom die Summe der Spannungen bzw. die Summe der Ströme – gleiche Belastung aller drei Phasen vorausgesetzt – gleich Null ist, können die drei Wicklungen einer Drehstrommaschine verkettet werden, wobei die Schaltungsarten Stern- und Dreieckschaltung am meisten gebräuchlich sind.

Die drei Wicklungen einer Drehstrommaschine werden einheitlich bezeichnet:

	Anfang		Ende
1. Wicklung	U	—	X
2. Wicklung	V	—	Y
3. Wicklung	W	—	Z

Diese Bezeichnungen sind auch an den Klemmenbrettern der Maschine vorhanden. Abb. 12.4 zeigt das Klemmenbrett einer Drehstrommaschine.

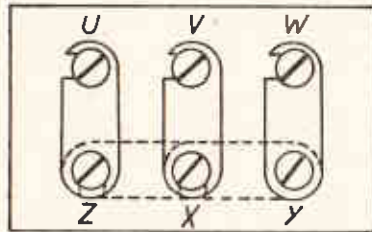


Abb. 12.4 – Klemmenbrett einer Drehstrommaschine

Die einzelnen Anschlußklemmen der Wicklungen werden so angeordnet, daß die Maschine durch einfaches Umklemmen der Verbindungs-laschen wahlweise in Stern- oder Dreieckschaltung betrieben werden kann. Stehen die Verbindungs-laschen waagrecht, ist die Maschine stern-geschaltet. Bei senkrechter Stellung der Laschen ergibt sich dagegen die Dreieck-schaltung. Die Anschlußleitungen werden mit R, S und T bezeichnet. Wird der Mittelpunkt-leiter bei Sternschaltung mit-geführt, so wird er mit Mp gekennzeichnet. Für die Leitungen ist in Schaltanlagen eine einheitliche Farbkennzeichnung üblich:

geföhrt, so wird er mit Mp gekennzeichnet. Für die Leitungen ist in Schaltanlagen eine einheitliche Farbkennzeichnung üblich:

R	—	gelb
S	—	grün
T	—	violett
Mp (geerdet)	—	schwarz mit weißem Strich

12.1.3. Regelung der Wechsel- und Drehstromgeneratoren

Um die Höhe der im Generator erzeugten Spannung zu beeinflussen, also zu regeln, könnte man die drei Größen ändern, von denen die Höhe der induzierten Spannung abhängt. Das sind

- die Bewegungsgeschwindigkeit (Drehzahl),
- die wirksame Länge des Leiters (Windungszahl) und
- die Stärke des Magnetfeldes (Erregerstrom).

Eine Änderung der Drehzahl hat zwangsläufig eine Änderung der Frequenz zur Folge, was im allgemeinen unerwünscht ist. Die Windungszahl

wird bei der Konstruktion der Maschine festgelegt und läßt sich später nicht ändern.

Zur Regelung der Höhe der erzeugten Spannung wird daher in Generatoren ausschließlich die Stärke des Magnetfeldes geändert. Diese Regelung wird durch Regelwiderstände im Erregerstromkreis vorgenommen.

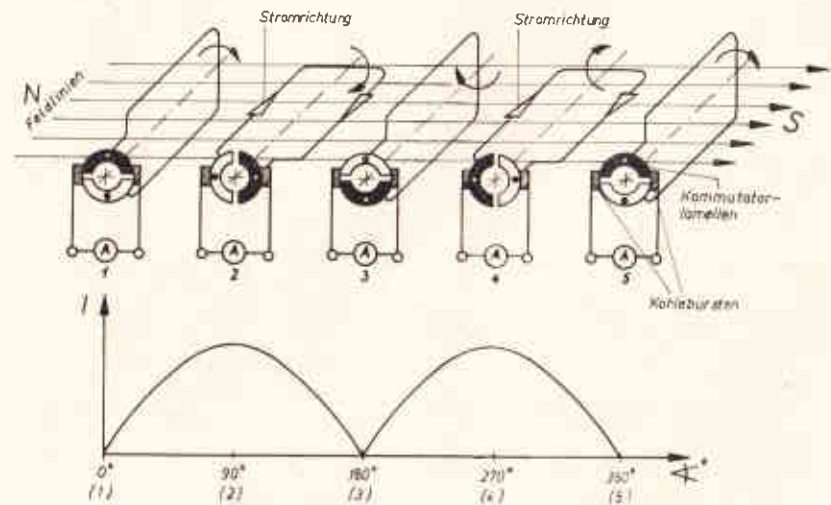
12.1.4. Gleichstromerzeugung

Bei der Drehung einer Leiterschleife im Magnetfeld wird eine Wechselspannung bzw. ein Wechselstrom erzeugt.

Benötigt man jedoch Gleichstrom, so muß man den Wechselstrom gleichrichten. Man erreicht das bei einem Generator durch die Unterteilung der Schleifringe in Lamellen, die voneinander isoliert und mit den Enden der Leiterschleife verbunden sind. Wegen ihrer Wirkungsweise nennt man eine solche Anordnung Stromwender oder Kommutator. Die Wirkungsweise des Stromwenders soll in folgenden Skizzen verdeutlicht werden:

Abb. 12.5 zeigt eine im Magnetfeld bewegte Leiterschleife in 5 verschiedenen Stellungen jeweils um 90° weitergedreht. Mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel läßt sich die Richtung des induzierten Stroms bestimmen. Verfolgt man nun die Richtung des Stroms, der über die Kohlebürsten in den äußeren Stromkreis geleitet wird, so stellt man fest, daß sich die Stromrichtung hier nicht mehr ändert.

Der Stromwender bewirkt also im Nulldurchgang des induzierten Wechselstroms eine Umpolung der Schleife. Er stellt eine Art mechanischer



Stromverlauf im Bürstenstromkreis

Abb. 12.5 – Wirkungsweise des Stromwenders

Gleichrichter dar. Die Halbwellen des Wechselstroms werden dadurch immer in gleicher Richtung in den äußeren Stromkreis geleitet. Wegen der erforderlichen Stromwendung können Gleichstromgeneratoren nur als Außenpolmaschine gebaut werden. Der durch den Stromwender einer Schleife abgeleitete Strom ist pulsierender Gleichstrom, der sich aus positiven Halbwellen zusammensetzt. Durch eine größere Zahl sternförmig angeordneter Wicklungen (Trommelanker) erreicht man, daß sich ihre Halbwellen überschneiden. Die Welligkeit des Gleichstroms wird dadurch herabgesetzt.

Abb. 12.6 verdeutlicht den Vorgang; hierbei zeigt:

- den in einer gedrehten Leiterschleife erzeugten Wechselstrom;
- den durch den Stromwender gleichgerichteten Wechselstrom (pulsierender Gleichstrom) und
- Gleichstrom, der durch mehrere sternförmig gegeneinander versetzte Wicklungen (Trommelanker) mit Hilfe eines Stromwenders erzeugt wird.

Sind mehr als eine Wicklung vorhanden, so muß natürlich der Stromwender in eine entsprechende Zahl von Lamellen unterteilt werden. Die Zahl der Lamellen entspricht im allgemeinen der Zahl der Wicklungen, da jeweils das Ende einer Wicklung mit dem Anfang einer anderen Wicklung zusammen an eine Lamelle gelötet wird (vgl. hierzu Abb. 12.7).

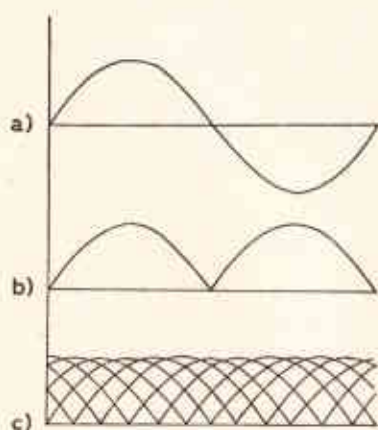


Abb. 12.6 – Umwandlung von Wechsel-
in Gleichstrom

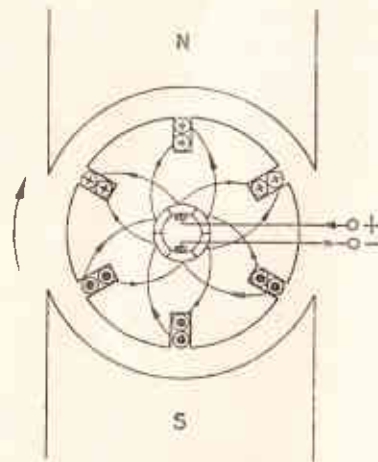


Abb. 12.7 – Trommelanker mit
Stromwender

12.1.4.1. Gleichstromgeneratoren

Da die Erzeugung elektrischen Stroms durch Induktion bei Wechsel- und Gleichstromgeneratoren grundsätzlich gleichartig ist, unterscheiden sie sich hauptsächlich durch ihre Stromabnahme vom Rotor, nämlich

Schleifringe beim Wechselstromgenerator und Stromwender (Kommutator) beim Gleichstromgenerator.

Für die Erregung des Magnetfeldes wird Gleichstrom benötigt. Da der Gleichstromgenerator aber selbst Gleichstrom erzeugt, benötigt er keine besondere Gleichstromquelle oder Erregermaschine. Beim Anlaufen eines Gleichstromgenerators reicht der im Eisenkern vorhandene Restmagnetismus aus, um den erforderlichen Erregerstrom zu erzeugen. Dieses sog. **dynamoelektrische Prinzip** wurde von Werner von Siemens erfunden und trug entscheidend dazu bei, daß die Elektrizität zu einer der wichtigsten Energieformen in Industrieländern wurde.

Der Aufbau einer Gleichstrommaschine ist in Abb. 12.8 dargestellt. Er ist im Prinzip bei Gleichstromgeneratoren und -motoren gleich.

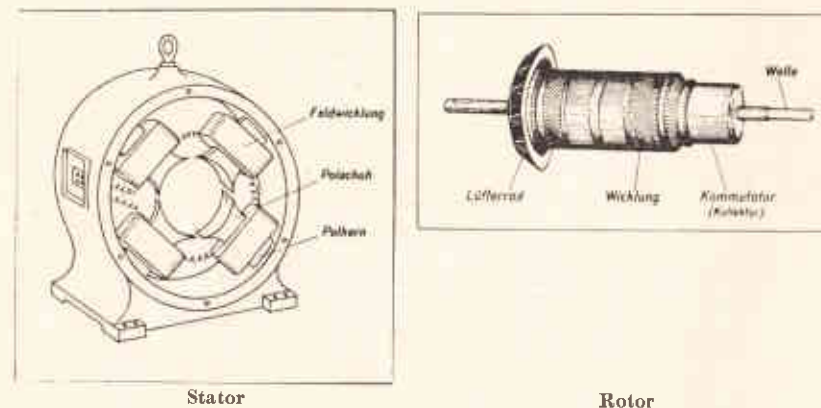


Abb. 12.8 – Aufbau einer Gleichstrommaschine

Die Polkerne im Stator und der Eisenkern des Rotors werden zur Verminderung der Wirbelstromverluste aus Dynamoblechen hergestellt. Um eine unzulässig hohe Erwärmung zu vermeiden, werden elektrische Maschinen fast ausschließlich mit einem auf den Rotor montierten Lüfterrad hergestellt.

Auch bei Gleichstrommaschinen sind einheitliche Klemmenbezeichnungen für die Wicklungen üblich:

	Anfang		Ende
1. Ankerwicklung	A	—	B
2. Nebenschlußwicklung	C	—	D
3. Hauptstromwicklung	E	—	F

Die Anschlußleitungen werden mit P (positiv) und N (negativ) bezeichnet. In Schaltanlagen findet man dafür folgende Farbkennzeichnungen:

P-Leitung	—	rot
N-Leitung	—	blau.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, daß sich in letzter Zeit für die Gleichstromerzeugung bei kleinem bis mittlerem Leistungsbedarf mehr und mehr Wechsel- oder Drehstromgeneratoren mit eingebautem Silizium-Gleichrichter durchsetzen.

Diese Art der Gleichstromerzeugung in Generatoren ermöglicht die Verwendung von Innenpolmaschinen (Stromabnahme über feste Klemmen) mit ihren Vorteilen und damit den Verzicht auf Stromwender. Da der Stromwender wegen der ständigen Umschaltung und Umpolung meistens eine **erhebliche Störquelle** z.B. auch für den Funkempfang darstellt, sind diese neuen „Gleichstromgeneratoren“ besonders vorteilhaft für den Einsatz in beweglichen (fahrbaren) Funksende- und Funkempfangseinrichtungen geeignet.

Wechsel- oder Drehstromgeneratoren mit eingebautem Gleichrichter gewinnen z.B. auch im Kraftfahrzeugbau als sog. Lichtmaschinen immer mehr an Bedeutung.

12.1.4.2. Regelung der Gleichstromgeneratoren

Wie bei Wechselstromgeneratoren wird auch hier im allgemeinen die Höhe der erzeugten Spannung durch die Änderung des Erregerstroms geregelt. Zur Regelung der Gleichstromgeneratoren wird allerdings fast nur die Nebenschlußwicklung herangezogen.

12.2. Motoren

Grundsätzlich ist jeder physikalische Vorgang umkehrbar. Als Umkehrung des Generatorprinzips erhält man das Motorprinzip. Mit wenigen Einschränkungen lassen sich nahezu alle elektrischen Maschinen sowohl als Generator als auch als Motor verwenden.

12.2.1. Entstehung eines Drehmoments

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm durch die Änderung des magnetischen Flusses eine Spannung erzeugt. Dieser Vorgang ist umkehrbar:

Legen wir an einen Leiter eine Spannung, die einen Stromfluß zur Folge hat, so entsteht um diesen Leiter herum ein Magnetfeld. Befindet ~~sich~~ der stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld, so wird er infolge der gegenseitigen Wirkungen des vorhandenen stehenden Magnetfeldes und des um ihn selbst herum entstehenden Magnetfeldes bewegt. Die **Bewegungsrichtung** eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld läßt sich nach der **Linken-Hand-Regel** ermitteln.

Die **Kraft**, mit der der stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld bewegt wird, ist abhängig von

- der **Stärke des stehenden magnetischen Feldes** (Induktion B),
- der **Stromstärke im Leiter** und
- der **wirksamen Länge des Leiters im magnetischen Feld** (Windungszahl).

Ordnen wir anstelle eines einzelnen Leiters eine stromdurchflossene drehbare Leiterschleife (oder auch Spule mit mehreren Windungen) im Magnetfeld an, so werden die beiden Zweige der Schleife in entgegengesetzter Richtung abgelenkt. Es entsteht ein Drehmoment. Nach dem Hebelgesetz ist dieses Drehmoment um so größer, je länger bei gleicher Kraftwirkung der Hebelarm ist. Der Hebelarm wird bei der drehbaren Leiterschleife durch den halben Schleifendurchmesser = Schleifenradius dargestellt. Die Größe des Drehmoments hängt also außer von der Kraftwirkung der Magnetfelder auch vom Durchmesser der Wicklung ab.

Wie wir im Abschn. 7.4 bei der Betrachtung einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld bereits festgestellt haben, ist der Drehantrieb nur so lange wirksam, bis sich beide Magnetfelder (äußeres stehendes Magnetfeld und Magnetfeld der stromdurchflossenen Spule) in die gleiche Richtung eingestellt haben. Um eine fortlaufende Drehung zu erzielen, müßte die Stromrichtung in der Spule in dem Augenblick umgepolt werden, in dem stehendes Magnetfeld und Spule senkrecht zueinanderstehen. Das Umpolen des Stroms in der Spule kann durch einen Stromwender (Kommutator) vorgenommen werden. Der Stromwender hat im Motor die Wirkungsweise eines mechanischen Wechselrichters.

Ein Motor mit einem Doppel-T-Anker würde verhältnismäßig unruhig laufen, da der Anker mehr oder weniger ruckartig angetrieben würde. Auch hier bietet ein Trommelanker mit vielen gegeneinander versetzten Spulen erhebliche Vorteile. Motoren mit Trommelanker laufen ruhiger und können besser in ihrer Drehzahl geregelt werden.

12.2.2. Gegenspannung im Motor

Wird eine stromdurchflossene Leiterschleife in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihr auch eine Spannung erzeugt. Wenden wir die beiden Regeln an:

- für die Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld (**Linke-Hand-Regel**) und
- für die Richtung der Induktionsspannung in einem Leiter, der in einem Magnetfeld bewegt wird (**Rechte-Hand-Regel**),

so stellen wir fest, daß in der Leiterschleife (oder Wicklung) eines Gleichstrommotors eine Spannung erzeugt wird, die der angelegten Spannung entgegengesetzt gerichtet ist. Die Höhe der Gegenspannung hängt von der Bewegungsgeschwindigkeit oder Drehzahl der Leiterschleife ab. Wird der Motor belastet, also gebremst, so sinkt die Drehzahl und die Gegenspannung. Als treibende Spannung ist für den Motorstrom daher immer nur die Differenz zwischen angelegter Spannung und Gegenspannung wirksam. Bei Belastung des Motors wird diese Spannungsdifferenz infolge Absinkens der Drehzahl und der dadurch geringeren Gegenspannung ansteigen, so daß auch die Stromaufnahme des Motors größer wird.

12.2.3. Aufbau von Gleichstrommotoren

Zur Erzeugung des Magnetfeldes werden nur in Kleinstmotoren manchmal noch Dauermagnete eingebaut. Wie bei Generatoren, so werden auch bei den Motoren fast ausschließlich Elektromagnete zum Aufbau des Magnetfeldes verwendet. Der

zur Erzeugung des Magnetfeldes erforderliche Erregerstrom und der für die Erzeugung des Drehmoments benötigte Strom wird ein und derselben Stromquelle entnommen. Der Stromverbrauch der Erregerwicklung ist im Verhältnis zum gesamten Motorstromverbrauch sehr gering. Er beeinträchtigt den Wirkungsgrad der Motoren nur unwesentlich.

Gleichstrommotoren unterscheiden sich grundsätzlich nicht in ihrem Aufbau von den Gleichstromgeneratoren.

Je nach Zusammenschaltung der Wicklungen eines Gleichstrommotors unterscheidet man zwischen

Nebenschlußmotoren, bei denen die Erregerwicklung parallel zur Ankerwicklung, also im Nebenschluß liegt,

Hauptstrommotoren, bei denen die Erregerwicklung wegen Reihenschaltung mit der Ankerwicklung vom Gesamtstrom (Hauptstrom) durchflossen wird und

Doppelschlußmotoren, bei denen sowohl eine Nebenschluß- als auch eine Hauptstrom-Erregerwicklung vorhanden ist.

Die drei Schaltungsarten werden sinngemäß auch für Gleichstromgeneratoren angewendet.

12.2.3.1. Eigenschaften der verschiedenen Gleichstrommotoren

Nebenschlußmotor: Die Nebenschlußwicklung liegt immer an der vollen Betriebsspannung. Somit ändert sich während des Betriebes die Stärke des Erregersfeldes nicht. Die Drehzahl eines Nebenschlußmotors ist wenig belastungsabhängig. Das Anzugsdrehmoment ist verhältnismäßig gering.

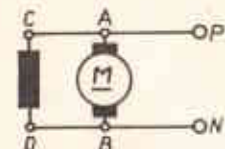


Abb. 12.9 – Neben-
schlußmotor

Verwendung: Wo es auf eine möglichst gleichbleibende Drehzahl und weniger auf kräftigen Anzug ankommt. Das gilt für Werkzeugmaschinen, Einankerumformer und Ruf- und Signalmaschinen.

Hauptstrommotor: Beim Einschalten des Motors steht der Anker noch still und erzeugt keine Gegenspannung. Der sich dadurch ergebende hohe Einschaltstrom durchfließt auch die Hauptstromwicklung und erzeugt ein besonders kräftiges Magnetfeld. Der Anker erhält einen entsprechend kräftigen Antrieb. Dagegen besteht beim Hauptstrommotor die Gefahr, daß sich seine Drehzahl unzulässig steigert, wenn er nicht belastet wird. Man spricht vom Durchdrehen eines Hauptstrommotors.

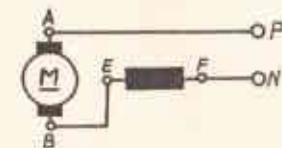


Abb. 12.10 – Hauptstrom-
motor

motor Verwendung: Wo es auf großes Anzugsdrehmoment ankommt und sichergestellt ist, daß der Motor ständig belastet ist. Das gilt für elektrische Bahnen, Elektrofahrzeuge, Fahrstühle, Kräne. Auch für Handbohrmaschinen werden Hauptstrommotoren verwendet. Das eingebaute Zahnradgetriebe verhindert dabei mit seiner Reibung ein Durchdrehen im Leerlauf.

- 212 -

Doppelschlußmotor: Da bei ihm sowohl eine Nebenschluß- als auch eine Hauptstromwicklung vorhanden ist, vereinigt er auch die entsprechenden Eigenschaften in sich. Die Drehzahlabhängigkeit von der Belastung ist noch in Grenzen zu halten; somit ist Leerlaufbetrieb möglich. Dagegen ist das Anzugsdrehmoment wesentlich höher als beim Nebenschlußmotor.

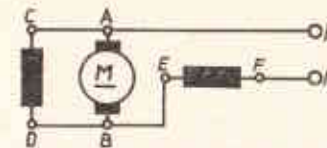


Abb. 12.11 – Doppelschlußmotor

Verwendung: Wo gutes Anzugsdrehmoment verlangt wird, aber der Motor nicht ständig belastet wird. Für Stanzen, Scheren, Walzenstraßen und Antrieb von Druckereimaschinen.

12.2.4. Universalmotor

Grundsätzlich kann auch der Gleichstrommotor, bei dem das Magnetfeld durch eine Erregerwicklung erzeugt wird, mit Wechselstrom betrieben werden. Durch die angelegte Wechselspannung wird die Richtung der Magnetfelder im Stator und Anker gleichzeitig (gleichphasig) geändert. Somit wirkt auch nach Umkehrung der Stromrichtung auf den Anker ein Drehmoment in gleicher Richtung. Man nennt solche Motoren wegen ihrer Verwendungsmöglichkeit bei Gleich- und Wechselstrom auch Universalmotoren. (Verwendung: Bohrmaschinen, Haushaltsmaschinen wie Staubsauger usw.) Da bei Universalmotoren an Wechselstrom auch die Richtung des Statormagnetfeldes ständig wechselt, muß bei ihnen der Statorisenkern zur Verminderung der Wirbelstromverluste ebenfalls aus Dynamoblechen hergestellt werden.

(Gleichstrommotoren mit Dauermagneten lassen sich nicht mit Wechselstrom betreiben, da bei ihnen das Feld nicht gleichzeitig mit dem Ankerfeld umgepolt wird.)

12.2.5. Motoren für Dreh- und Wechselstrom

12.2.5.1. Das magnetische Drehfeld

Ordnet man nach Abb. 12.12 drei Spulen um je 120° gegeneinander versetzt an und verkettet sie in Stern- oder Dreieckschaltung, so entsteht zwischen den Spulen beim Anlegen von Drehstrom ein magnetisches Drehfeld. Dieses magnetische Drehfeld läßt sich anhand des Drehstrom-Liniendiagramms leicht erklären. Nach der Drehstrom-Phasenfolge er-

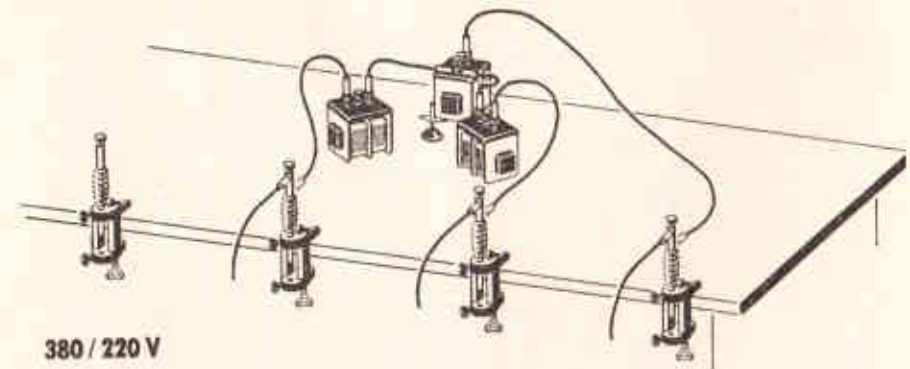


Abb. 12.12 – Nachweis des Drehfeldes

reichen die Ströme in den drei Spulen nacheinander ihren positiven Höchstwert. Da durch die Ströme in den Spulen Magnetfelder aufgebaut werden, wandern diese Felder scheinbar von einer Spule zur anderen – also im Kreis herum. Diese Auswirkung bezeichnet man als magnetisches Drehfeld.

Führt man drei um 120° gegeneinander versetzten Spulen drei Wechselströme zu, die ebenfalls um 120° gegeneinander phasenverschoben sind (Drehstrom!), so entsteht zwischen den Spulen ein magnetisches Drehfeld.

Bei Einphasen-Wechselstrom läßt sich mit Hilfe eines Kondensators eine Phasenverschiebung von 90° und somit in zwei um 90° gegeneinander versetzten Spulen ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Durch richtige Bemessung der Kapazität kann nämlich erreicht werden, daß der Strom in der Spule 2 um genau 90° gegenüber dem Strom in der Spule 1 phasenverschoben ist. Um die Vorteile kollektorloser Elektromotoren auch bei Einphasen-Wechselstrom ausnutzen zu können, findet diese Art der Drehfelderzeugung große Verbreitung.

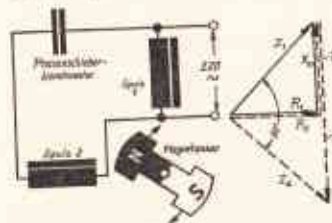


Abb. 12.13 – Drehfelderzeugung bei Einphasen-Wechselstrom

Man findet sie z. B. in Synchron- und Asynchronmotoren für Synchronuhren, Tonbandgeräte und Plattenspieler.

Führt man zwei um 90° gegeneinander versetzten Spulen zwei Wechselströme zu, die um 90° phasenverschoben sind, so ergibt sich ein magnetisches Drehfeld.

Die einfachste Art der Drehfelderzeugung findet man im Spaltpolmotor.

Bei ihm erreicht man durch eine besondere Formgebung des Eisenkerns, daß sich der magnetische Fluß Φ_{Spalte} einer Wechselstromdurchflossenen Spule teilt. Die Aussparungen am Kern bewirken nämlich eine Einschnürung des Kernquerschnitts, so daß nur ein Teil der magnetischen Feldlinien die Kurzschlußringe aus Kupfer durchsetzt. Wegen des Betriebs mit Wechselstrom wird infolge Induktion in den Kurzschlußringen ein Magnetfeld Φ_{Hilf} erzeugt, das nach dem Lenzschen Gesetz dem erzeugenden Magnetfeld entgegengesetzt gerichtet ist. Da der Strom in Induktivitäten erst langsam seinen Höchstwert erreicht, entsteht das Hilfsfeld zeitlich verzögert. (Die Zeitkonstante $\tau = L/R$ wird trotz nur einer Windung des Kurzschlußrings verhältnismäßig groß, weil der Widerstand R äußerst klein ist.) So entsteht ein magnetisches Drehfeld, bei dem allerdings das Hilfsfeld wegen der zwangsläufig auftretenden Verluste schwächer ist als das Spulenfeld. Dieses Verfahren wird für Asynchronmotoren mit geringeren Ansprü-

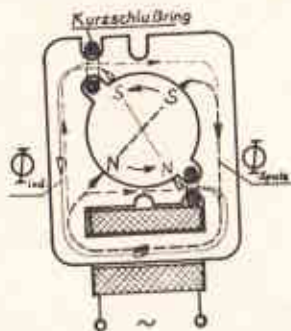


Abb. 12.14 – Drehfelderzeugung im Spaltpolmotor

chen an Laufruhe und Wirkungsgrad für Leistungen von 5 bis 100 W angewandt. Spaltpolmotoren werden u. a. in Haushaltsmaschinen aller Art und einfache Plattenspieler eingebaut.

12.2.5.2. Synchronmotor für Drehstrom

Bringt man zwischen die Spulen (Abb. 12.12) eine drehbar gelagerte Magnetnadel (Magnetanker), so dreht sie sich beim Einschalten des Drehstroms mit hoher Geschwindigkeit, denn der Nordpol der Magnetnadel wird vom im Kreis herumwandernden Südpol des magnetischen Drehfeldes angezogen und daher gedreht. Ebenso ist es mit dem Südpol der Magnetnadel; er wird vom drehenden Nordpol des Drehfeldes mitgezogen. Damit haben wir das Prinzip des Synchronmotors. Die Drehzahl der Magnetnadel entspricht nämlich genau der Drehzahl des magnetischen Drehfeldes, d. i. bei 50-Hz-Drehstrom 50mal in der Sekunde und 3000mal in der Minute. Ist die Frequenz des zugeführten Drehstroms konstant, so ist auch die Drehzahl des Magnetankers konstant.

Der Magnetanker eines Synchronmotors läuft zeitlich gleich (synchron) mit der Drehzahl des magnetischen Drehfeldes, also auch gleich mit der Frequenz.

Vertauscht man zwei der Drehstromzuleitungen, so erreicht man damit eine Umkehrung der Drehrichtung.

Größere Synchronmotoren haben natürlich anstelle eines Dauermagneten im Anker einen Elektromagneten (Feldwicklung), der mit Gleichstrom gespeist werden muß. Da ein Motoranker schwerer ist als eine Magnetnadel, muß er wegen seiner größeren Massenträgheit angeworfen werden. Das erreicht man heute meistens mit Hilfe einer Kurzschluß-Wicklung auf dem Anker, wie sie beim Asynchron-Motor besprochen wird.

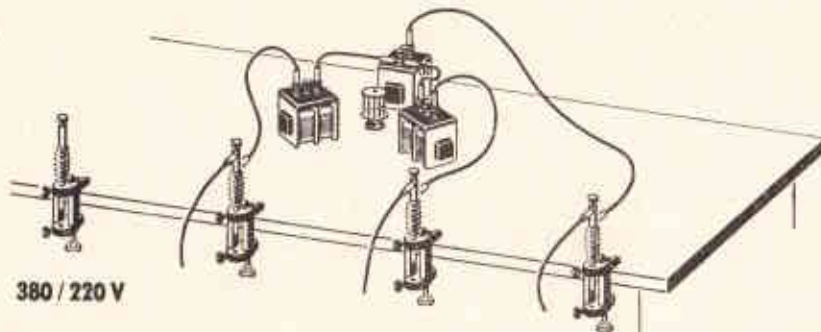
12.2.5.3. Eigenschaften und Anwendung des Synchronmotors

Der besondere Vorteil des Synchronmotors ist sein Gleichlauf mit der Frequenz. Da die Netzfrequenz als konstant anzusehen ist, erreicht man mit einem Synchronmotor einen Antrieb mit gleichbleibender Drehzahl. Er findet daher Anwendung zum Antrieb elektrischer Uhren (Synchronuhren) und elektroakustischer Geräte (Studiotonbandgeräte). Sein Nachteil ist, daß er mit Hilfsvorrichtungen angeworfen werden muß und daß er bei zu starker Belastung stehenbleibt.

12.2.5.4. Drehstrom- und Wechselstrom-Asynchronmotor

Ordnen wir im Drehfeld (Drehstrom oder Wechselstrom mit Hilfsphase) einen Anker an, dessen Wicklungen kurzgeschlossen sind (Kurzschluß- oder Käfiganker), so wird in den Windungen des Ankers durch das Wechselfeld des Stators ein Strom induziert. Ein solcher Motor wirkt wie ein

Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärseite. Der in den kurzgeschlossenen Windungen induzierte Strom verursacht ein Drehmoment, das den Anker in Drehbewegung versetzt. Der Anker wird in Richtung des Drehfeldes „mitgezogen“. Zum Beweis dieses Vorganges bedienen wir uns des Versuchsaufbaus nach Abb. 12.15. Das magnetische Drehfeld wird wieder mit Hilfe von drei um 120° gegeneinander versetzten Spulen erzeugt, denen Drehstrom zugeführt wird. In die Mitte zwischen die Spulen wird ein drehbar gelagerter Kurzschlußring oder Käfiganker gestellt.



380 / 220 V

Abb. 12.15 – Asynchronmotor (Versuchsaufbau)

Beim Einschalten des Stroms beginnt sich der Kurzschlußanker zu drehen. Vergleicht man die Drehzahl mit der Drehzahl eines Magnetankers, so kann man deutlich feststellen, daß der Kurzschlußanker langsamer läuft.

Der Kurzschlußanker läuft nicht mit gleicher Drehzahl des Drehfeldes. Daher wird ein solcher Motor als Asynchron¹⁾-Motor bezeichnet.

Die Nacheilung des Ankers gegenüber dem Drehfeld bezeichnet man als Schlupf. Bei größeren Asynchronmotoren beträgt der Schlupf etwa 2 bis 5%. Ohne diesen Schlupf könnte ein Asynchronmotor nicht laufen. Würden nämlich Drehzahl des Drehfeldes und Drehzahl des Kurzschlußankers gleich sein, dann würde in der Kurzschlußwicklung kein Induktionsstrom erzeugt (keine Änderung des magnetischen Flusses). Damit hätte der Anker kein Magnetfeld. Der Kurzschlußanker muß also zwangsläufig dem Drehfeld nacheilen, damit eine Flußänderung erzielt wird.

12.2.5.5. Eigenschaften und Anwendung des Asynchronmotors

Der Asynchronmotor läuft beim Einschalten von selbst an. Er benötigt also nicht – wie der Synchronmotor – besondere Anwurfseinrichtungen. Sein Kurzschlußanker kann sehr einfach und billig hergestellt werden:

¹⁾ asynchron = nicht im Gleichlauf

Die Kurzschlußwicklung wird flüssig unter Druck in das Rotor-Blechpaket eingepreßt. Dabei braucht die „Wicklung“ nicht einmal vom Eisenkern isoliert zu werden. Somit kann auch keine Betriebsstörung durch Isolationsfehler im Rotor auftreten.

Nachteil des Asynchronmotors ist, daß seine Drehzahl belastungsabhängig schwankt – also nicht konstant bleibt. Wegen seiner Robustheit findet der Asynchronmotor heute die verbreitetste Anwendung für Antriebe aller Art. Auch für den Plattenspieler- und Tonbandgeräte-Antrieb wird überwiegend der Asynchronmotor verwendet. Dabei werden Drehzahl-schwankungen durch große Schwungmassen ausgeglichen.

12.3. Maschinenumformer

Eine Kombination von Motor und Generator finden wir bei den Maschinenumformern; sie bestehen aus Elektromotor (Antrieb) und Generator (Stromerzeuger). Die Anker beider Maschinen sind im allgemeinen auf einer gemeinsamen Welle montiert, wobei aus mechanischen Gründen häufig eine elastische Kupplung zwischen Motor- und Generatorwelle geschaltet wird.

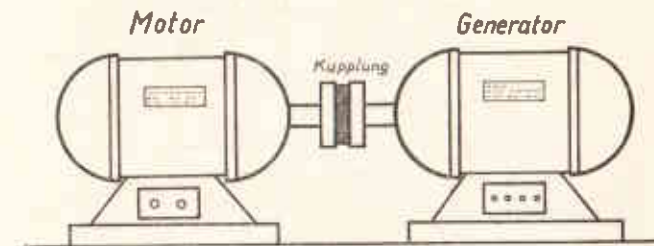


Abb. 12.16 – Maschinenumformer

Für die Anwendung von Maschinenumformern gibt es viele Möglichkeiten. Anwendungsbeispiele sind in folgender Übersicht zusammengestellt:

Umformung von	in
Gleichstrom	Gleichstrom anderer Spannung oder Stromstärke
Gleichstrom	Wechsel- oder Drehstrom
Wechsel- oder Drehstrom	Wechsel- oder Drehstrom anderer Frequenz
Wechsel- oder Drehstrom	Gleichstrom

Für kleinere Leistungen sind die Maschinenumformer heute schon weitgehend durch Transistorwandler abgelöst worden. Dagegen sind für mittlere und große Leistungen Maschinenformer wirtschaftlicher. Sie werden in vielen Zweigen der Fernmeldetechnik eingesetzt.

12.3.1. Einankerumformer / Ruf- und Signalmaschine (RSM)

Antriebsmotor und Generator brauchen nicht unbedingt in zwei getrennte Maschinengehäuse eingebaut zu werden. Man kann Motor und Generator in einer Maschine vereinigen, indem man auf einem Anker sowohl die Motorwicklung als auch die Generatorwicklung unterbringt. Da diese Umformer nur einen Anker besitzen, nennt man sie Einankerumformer.

Die Ruf- und Signalmaschinen der Wahlvermittlungsstellen sind Einankerumformer. Sie werden im allgemeinen an der Amtsspannung 60 V = betrieben und erzeugen

- den Rufstrom 25 Hz (ca. 60...75 V) und
- den Hörzeichenstrom 450 Hz (ca. 5...7 V).

In Abb. 12.17 wird die Rufstromerzeugung veranschaulicht.

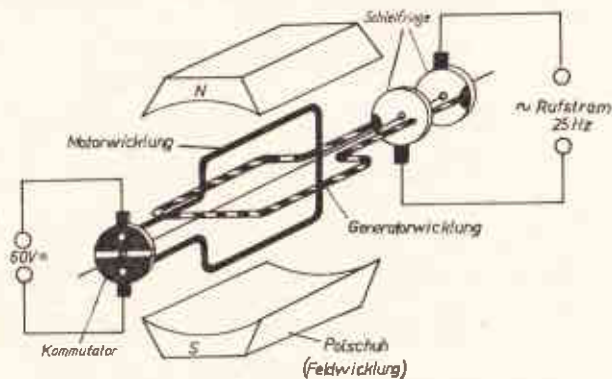


Abb. 12.17 – Erzeugung des 25-Hz-Rufstroms in der RSM

Da der Antrieb durch Gleichstrom erfolgt, muß die Motorwicklung an einem Stromwender liegen. Um 90° gegen die Motorwicklung versetzt ist die Generatorwicklung aufgebracht worden. Sie endet an Schleifringen wegen der Wechselstromabnahme. Der Motor ist als Gleichstrom-Nebenschlußmaschine geschaltet. Die Erregerfeldwicklung liegt somit ebenfalls an 60 V Gleichspannung und erzeugt gleichzeitig das für die Generatorwicklung erforderliche Magnetfeld. Da nur ein Polpaar vorhanden ist, muß die Drehzahl des Ankers zur Erzeugung eines Wechselstroms mit der Frequenz 25 Hz nach der bereits abgeleiteten Formel

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{25 \cdot 60}{1} = 1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

betragen.

Der Hörzeichenstrom soll eine Frequenz von 450 Hz haben und muß daher auf andere Weise erzeugt werden. Man bedient sich dazu des Tonrad-Prinzips. Ein drehbarer Eisenkern aus Dynamoblechen ist mit Nuten versehen. Dreht sich der Eisenkern zwischen zwei Polschuhen eines Elektromagneten, so wird der magnetische Fluß verstärkt, wenn sich Zähne und Polschuhe gegenüberstehen (hohe Permeabilität), und geschwächt, wenn sich die Nuten vor den Polschuhen befinden (niedrige Permeabilität).

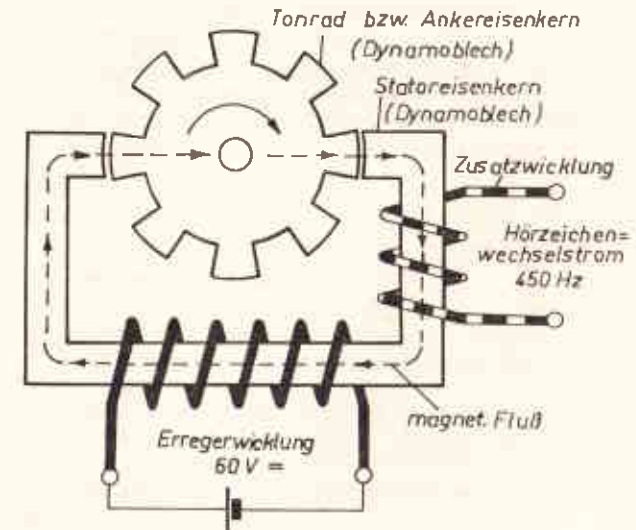


Abb. 12.18 – Hörtonerzeugung in der RSM

Infolge der Änderung des magnetischen Flusses wird in einer zusätzlich auf den feststehenden Eisenkern aufgetragenen Hörtonwicklung ein Wechselstrom induziert. Die Frequenz des erzeugten Wechselstroms hängt von der Drehzahl des Tonrads und der Zahl der Zähne bzw. Nuten ab. Da die Drehzahl der RSM bereits mit 1500 U/min festliegt, muß die Zahl der Zähne auf die geforderte Frequenz von 450 Hz abgestimmt werden.

In die bekannte Formel eingesetzt, ergibt sich

$$z = p \cdot \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{450 \cdot 60}{1500} = 18 \text{ Zähne}$$

Das hier besprochene Tonrad findet man jedoch nur in Ruf- und Signalmaschinen geringer Leistung. Bei den größeren RSM wird der Eisenkern des Ankers als Tonrad ausgenutzt. Er erhält 18 Nuten, die die Wicklungen für Antrieb und Rufstromerzeugung aufnehmen. Die Hörtonwicklung ist als Zusatzwicklung im Stator der RSM vorhanden.

Band 5

— **Werkstoffbearbeitung**

Werk- und Hilfsstoffe — Werkstoffbearbeitung — Technisches Zeichnen
— Arbeitsschutz und Unfallverhütung — Umgang mit Tabellenbüchern

● **Repetitor zum Band 5**

Band 6

— **Fernsprechapparate — Fernsprechentstörung — Nebenstellenanlagen (mit Beiheft)**

Fernsprechapparate — Zusatzeinrichtungen — Fernsprechentstörung — VDE-Bestimmungen — Unfallverhütung — Allgemeines über Nebenstellenanlagen — Die Ausführung der Nebenstellenanlagen — Schaltungsaufbau — Aufbau und Bedienen des HVt

● **Repetitor zum Band 6**

Band 7

— **Linientechnik (2 Teile)**

Zweck und Aufbau der Bauteile im Ortsanschlußnetz — Kabelkanalanlage — Fernmeldekabel — Einziehen von Röhrenkabeln — Auslegen von Erdkabeln — Kabelmontagearbeiten — Druckluftüberwachung von Ortskabeln — Schutz gegen Korrosion — Linienunterlagen für Ortsnetze — Auskundung — Bau oberirdischer Ortsanschlußlinien — Bau oberirdischer Kabelanlagen — Unterhaltungsarbeiten an Holzmastlinien — Sprechstellenbau — Teilnehmereinrichtungen — Erdungsanlagen — Schutz gegen Überspannungen und Überströme

● **Repetitor zum Band 7**

Band 8

— **Grundlagen der Vermittlungstechnik (mit Beiheft)**

Aufbau und Wirkungsweise der Schrittschalt- und Motordrehwähler — Orts- und Fernvermittlungstechnik — Schaltkennzeichen — Einstellvorschriften — Signaleinrichtungen, Prüf- und Meßeinrichtungen — Stromversorgung — Aufteilung großer Ortsnetze — Netzgestaltung im Selbstwählfersdienst — Unterhalten und Bedienen von Orts- und Fernvermittlungsstellen — Gliederung des Unterhaltungsdienstes

● **Repetitor zum Band 8**

Band 9

— **Übertragungs- und Datentechnik**

Elektroakustik — Leitungstechnik — Trägerfrequenztechnik — Grundlagen der Fernschreib- und Datentechnik

● **Repetitor zum Band 9**

— **Weitere Lehrbücher siehe 2. und 4. Umschlagseite** —

Band 10

— Grundlagen der Schaltungs- und Meßtechnik

Anschluß- und Verbindungstechniken — Bauelemente, Bauteile und Grundlagen der Schaltungstechnik — Niederspannungsnetz, Schutzmaßnahmen und Installationen, Gefährdung des Menschen durch den elektrischen Strom — Messen und Prüfen

● **Repetitor zum Band 10**

Die Bände werden noch durch den **Sonderband „Grundlagen der Elektronik (mit Repetitor)“** ergänzt, der beim Institut zur Entwicklung moderner Unterrichtsmedien e.V., 28 Bremen 1, Bahnhofstraße 10, bestellt werden kann. Der Band ist wie folgt gegliedert:

Sonderband — Grundlagen der Elektronik

Meßtechnik — Halbleiter — Halbleiterdioden — Transistor — Vierschicht-halbleiter-Bauelemente — Elektronenröhren — RC-Glieder — Kippstufen — Verknüpfungsglieder

● **Repetitor zum Band Grundlagen der Elektronik**

Allgemeines Prüfungswissen (2 Teile)

(für die Kräfte des BFW-, BfT- und BPT-Dienstes)

● **Repetitor zum Band Allgemeines Prüfungswissen**

**Wichtig zur Vorbereitung
auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen**

Deutschlehre
(mit Beiheft)

Rechtschreibung — Wortlehre — Satzlehre — Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde — Übungsaufgaben — Übungsdiktate — Lösungen

Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Sortenverwandlung — Übungsaufgaben — Angewandte Aufgaben — Lösungsheft

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei:
Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag
6 Frankfurt 71 — Rhonestraße 2