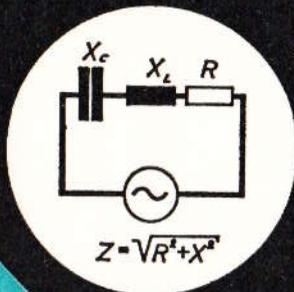
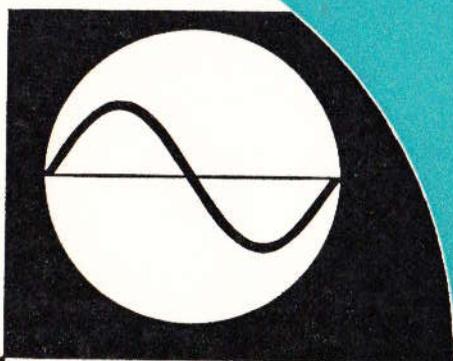
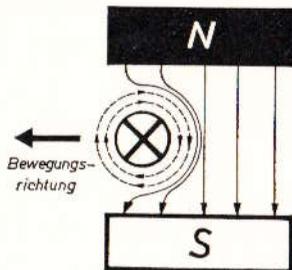


Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —



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



Band B 4

(Teil 2)

Wechselstromlehre

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —

17

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

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

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe AFt —

Herausgegeben mit Unterstützung
des Bundesministers für das Post- und Fernmeldewesen

Band B 4

(Teil 2)

Wechselstromlehre

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

5., verbesserte und erweiterte Auflage

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

Vorwort

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

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

In der Fernmeldehandwerkerprüfung sowie in den Grundlehrgängen Ft 1 und 2 müssen neben den praktischen Fertigkeiten auch die theoretischen Fachkenntnisse über die Fernmeldetechnik vorhanden sein. Das gleiche gilt hinsichtlich der Kenntnisse in dem wichtigen Prüfungsfach „Allgemeine Berufskunde“ sowie in bezug auf die Grundkenntnisse über die für das Fernmeldewesen wichtigen Gesetze und Verordnungen wie FAG, TWG und FeO. Einer der Bände allein kann dem Leser dieses umfangreiche Wissen nicht vermitteln; alle siebzehn Bände zusammen (vgl. hierzu die Angaben auf der 2. und 3. Umschlagseite) enthalten jedoch das Fachwissen, das sich der Leser im Interesse des Prüfungserfolges und seines weiteren Aufstiegs aneignen muß. In dem „Handbuch der Fernmeldetechnik“ ist nur der unbedingt notwendige Lehrstoff in einfachster Form behandelt worden. Die Verfasser erheben nicht den Anspruch, daß die Bände alle Vorschriften und technischen Einzelheiten sowie das in der Praxis selten oder gar nicht Vorkommende enthalten. Ihnen ging es vielmehr darum, eine

Fibel für den Fernmeldelehrling,
für den Fernmeldearbeiter,
für den Handwerker aus artverwandten Berufen und
für den Fernmeldehandwerker

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

Stand: Sommer 1970

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

Hinweis

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

Der Lehrstoff ist wie folgt gegliedert:

Teil 1
Physikalische Grundlagen zur Wechselstromlehre

Teil 2
Anwendungsbereiche der Wechselstromlehre

Beide Teile des Bandes B 4 stellen ein Ganzes dar und umfassen den Lehrstoff, den der Lernende beherrschen muß. In dem Teil 1 des vorgenannten Bandes werden u. a. folgende Sachgebiete behandelt:

Magnetismus und seine Größen,
Wirkungen des Magnetismus,
Fremdinduktion,
Selbstinduktion,
Entstehung des Wechselstromes,
Wechselstromwiderstände,
Leistung im Wechselstromkreis,
Resonanz,
Filter.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Elektrische Maschinen	
1.1. Die Erzeugung elektrischer Energie in Generatoren	7
1.1.1. Grundsätzlicher Aufbau elektrischer Maschinen	7
1.1.2. Der Kurbelinduktor	8
1.1.3. Wechselstromgeneratoren	8
1.1.4. Die Drehstromerzeugung	10
1.1.5. Die Gleichstromerzeugung	12
1.1.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.1.	18
1.2. Motoren	19
1.2.1. Entstehung eines Drehmoments	19
1.2.2. Die gegen elektromotorische Kraft beim Motor	20
1.2.3. Aufbau und Schaltung von Gleichstrommotoren	20
1.2.4. Der Universalmotor	21
1.2.5. Motoren für Dreh- und Wechselstrom	21
1.2.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.2.	25
1.3. Maschinenumformer	26
1.3.1. Einankerumformer / Ruf- und Signalmaschine (RSM)	27
1.3.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.3.	29
2. Transformatoren / Fernmeldeübertrager	
2.1. Starkstromtransformatoren	29
2.1.1. Wirkungsweise und Anwendung des Transformators	29
2.1.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Transformators	40
2.1.3. Der Schutztransformator	42
2.1.4. Der Spartransformator	42
2.1.5. Meßwandler	43
2.1.6. Transformatoren für Drehstrom	43
2.1.7. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.	43
2.2. Der Übertrager in der Fernmeldetechnik	44
2.2.1. Anwendung des Übertragers	44
2.2.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Übertragers	45
2.2.3. Das Übersetzungsverhältnis des Übertragers	46
2.2.4. Die Induktionsspule	48
2.2.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2.	49
3. Die Stromversorgung von Fernmeldeanlagen	
3.1. Anforderungen an die Stromversorgung von Fernmeldeanlagen	49
3.2. Die Gewinnung des erforderlichen Gleichstroms	51
3.2.1. Der Trockengleichrichter	51
3.2.2. Gleichrichterschaltungen	53
3.2.3. Siebung	56
3.2.4. Die Reihen- und Parallelschaltung von Gleichrichterzellen	59
3.2.5. Spannungsregelung	60
3.2.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.2.	61
3.3. Die Betriebsarten der Stromversorgungseinrichtungen für Fernmeldeanlagen	61
3.3.1. Reiner Batteriebetrieb (Lade- und Entladebetrieb)	62
3.3.2. Pufferbetrieb	62
3.3.3. Bereitschaftsbetrieb	64
3.3.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.3.	66

	Seite
3.4. Netzersatzanlagen	66
3.4.1. Ortsfeste Netzersatzanlagen (NEA)	66
3.4.2. Fahrbare Netzersatzanlagen	67
4. Schutzmaßnahmen gegen Berührungsspannungen	
4.1. Isolierung	68
4.1.1. Betriebsisolierung	68
4.1.2. Isolierung des Menschen von der Erde	69
4.1.3. Schutzisolierung	69
4.2. Kleinspannung	70
4.3. Schutztrennung	71
4.4. Nullung	72
4.5. Schutzerdung	73
4.6. Schutzschaltung	73
4.7. Schutzmaßnahmen für Fernmeldeeinrichtungen	74
4.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 4.1. bis 4.7.	75
5. Elektroakustik	
5.1. Das Wesen des Schalls	75
5.2. Die Schallausbreitung	78
5.3. Physikalische Größen und deren Einheiten	78
5.4. Das menschliche Ohr	79
5.4.1. Das Hörvermögen für Tonhöhen	80
5.4.2. Die Hörfäche	80
5.4.3. Das Lautstärke-Hörvermögen	81
5.5. Die elektroakustische Übertragung	84
5.5.1. Frequenzbereich / Übertragungsbereich	84
5.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 5.1. bis 5.5.	87
5.7. Elektroakustische Wandler (Mikrofone, Fernhörer)	87
5.7.1. Mikrofone	87
5.7.2. Fernhörer	94
5.7.3. Einsatz der Kapselgruppen	98
5.8. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.7.	99
6. Die Leitungstechnik	
6.1. Die Übertragung von Nachrichten	99
6.2. Fernmeldeleitungen und ihre Eigenschaften	101
6.2.1. Der Wirkwiderstand	101
6.2.2. Isolationswiderstand und Ableitung	102
6.2.3. Die Leitungsinduktivität	102
6.2.4. Die Leitungskapazität	103
6.2.5. Die vier Leitungskennwerte	104
6.2.6. Der Wellenwiderstand	105
6.3. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.1. und 6.2.	106
6.4. Die Anpassung	107
6.5. Die Dämpfung	109
6.5.1. Die Leitungsdämpfung	109
6.5.2. Die Bezugsdämpfung	115
6.6. Maßnahmen zur Herabsetzung der Leitungsdämpfung	116
6.7. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.4. bis 6.6.	120

	Seite
6.8. Übertragungsstörungen auf Fernmeldeleitungen	120
6.8.1. Dämpfungsverzerrungen	120
6.8.2. Nichtlineare Verzerrungen (Klirrvverzerrungen)	121
6.8.3. Die Laufzeit	121
6.8.4. Laufzeitverzerrungen	122
6.8.5. Geräusche	122
6.9. Kopplungen	123
6.9.1. Galvanische Kopplungen	123
6.9.2. Kapazitive Kopplungen	123
6.9.3. Induktive Kopplungen	123
6.9.4. Beseitigung der Kopplungen	124
6.10. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.8. und 6.9.	128
7. Die Mehrfachausnutzung von Leitungen	
7.1. Die Phantomschaltung	129
7.2. Die Trägerfrequenztechnik	130
7.2.1. Trägerfrequenz-Systeme	132
7.3. Leitungen und Kabel für Trägerfrequenzbetrieb	134
7.4. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 7.1. bis 7.3.	134
8. Elektronenröhren	
8.1. Elektronenemission	135
8.2. Röhrenheizung	136
8.2.1. Direkte Heizung	136
8.2.2. Indirekte Heizung	137
8.3. Elektronenröhren	137
8.3.1. Zweipolröhre (Diode)	139
8.3.2. Dreipolröhre (Triode)	140
8.4. Die Bezeichnung von Elektronenröhren	146
8.5. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 8.1. bis 8.4.	147
Anhang: Elektrische Eigenschaften einiger Leitungsarten	148

1. Elektrische Maschinen

1.1. Die Erzeugung elektrischer Energie in Generatoren

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm infolge Änderung des magnetischen Flusses eine Induktionsspannung erzeugt. Wie bereits im Teil I 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 Induktionsstromes 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 an Stelle 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 Wechselfspannung 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 Kleinstmaschinen werden hin und wieder Metallbürsten eingebaut.

Die einfachste Anordnung eines Generators ist der Wechselstromgenerator.

1.1.1. Grundsätzlicher Aufbau elektrischer Maschinen

Bei einer elektrischen Maschine ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

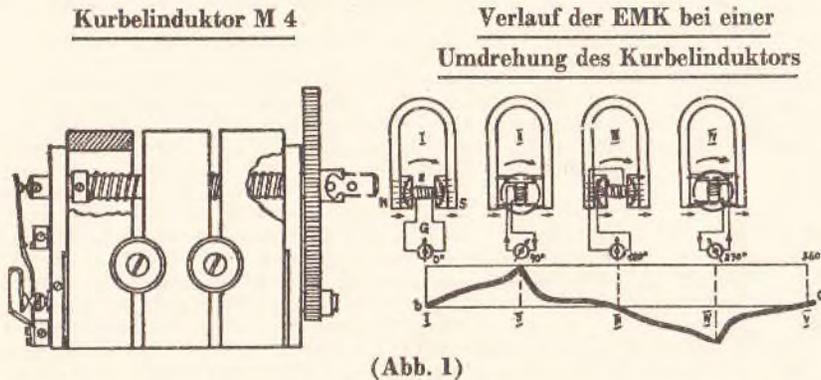
- a) einem feststehenden Teil, dem **Ständer oder Stator**,
und
- b) einem sich drehenden Teil, dem **Anker oder Rotor**
(auch **Läufer** genannt).

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.

1.1.2. Der Kurbelinduktor

Zur Erzeugung der Rufwechselspannung wird in Fernsprechapparaten mit OB-Betrieb (OB = Ortsbatterie) der Kurbelinduktor verwendet. Das Magnetfeld wird bei ihm durch einen oder mehrere Hufeisenmagnete gebildet. Zwischen seinen Polshuhen 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 gleich-



(Abb. 1)

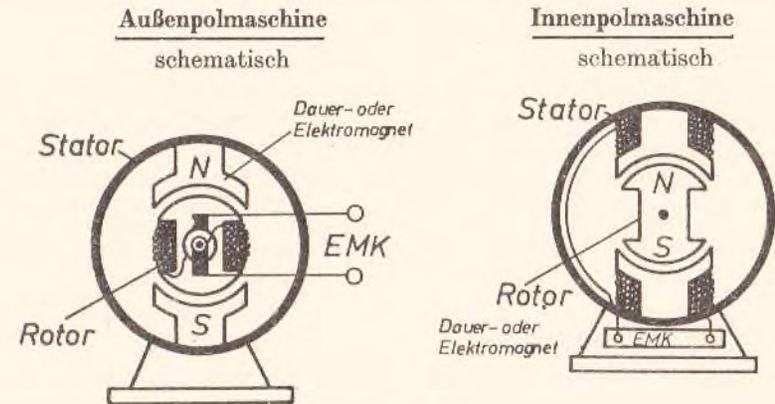
mäßiger Drehung. In den Kurbelinduktoren neuerer Ausführung wird bei 3 Kurbelumdrehungen pro Sekunde eine Wechselspannung von etwa 70 Volt erzeugt. Die Frequenz beträgt bei der üblichen Zahnradübersetzung von 1:7 ($3 \cdot 7 = 21$ Ankerumdrehungen pro Sekunde) 21 Hz. Damit der Kurbelinduktor mit seiner Wicklung keinen Nebenschluß für die Sprechwechselströme darstellt, wird er erst bei Betätigung der Kurbel durch einen Kontakt eingeschaltet.

1.1.3. 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 fest steht, gibt es zwei grundsätzliche Bauarten von elektrischen Maschinen:

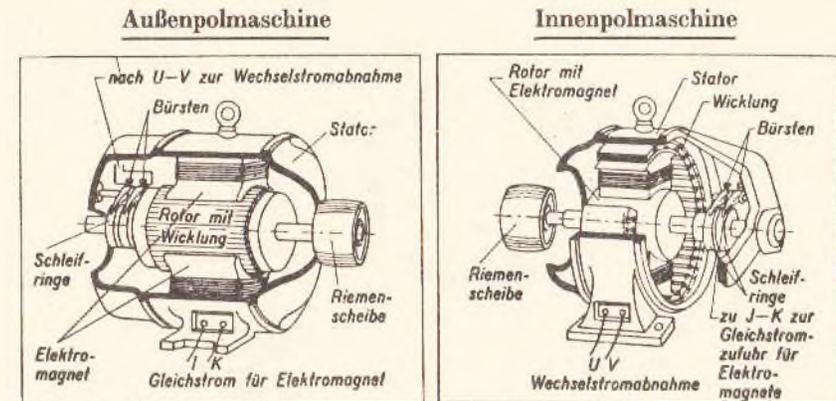
- die Außenpolmaschine, bei der das Magnetfeld im Stator erzeugt wird und
- die Innenpolmaschine, bei der das Magnetfeld im Rotor erzeugt wird.



(Abb. 2)

Zum besseren Verständnis sind Außenpol- und Innenpolmaschine in Abb. 2 schematisch dargestellt worden. Die Abb. 3 zeigt den Aufbau etwas ausführlicher. 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.

Die in den Abb. 2 und 3 dargestellten Generatoren sind Wechselstromgeneratoren. Da in einer im Magnetfeld gedrehten Leiterschleife grund-



(Abb. 3)

sätzlich Wechselstrom erzeugt wird, sind Wechselstromgeneratoren in ihrem Aufbau am einfachsten.

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 Wechselstromes dienen – zu groß. Aus diesem Grunde werden größere Generatoren als Innenpolmaschinen hergestellt.

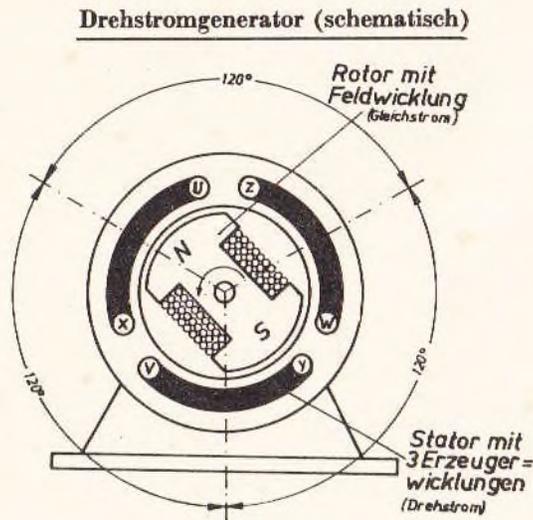
Das Magnetfeld wird beim Innenpolgenerator im Rotor aufgebaut, so daß der im Stator erzeugte Strom über feste Verbindungen, die Anschlußklemmen, abgenommen werden kann. Der erforderliche Erregerstrom ist wesentlich niedriger als der im Generator erzeugte Wechselstrom (erforderliche Erregerleistung etwa 1 bis 2% der Maschinenleistung).

Die Belastung der Schleifringe und Kohlebürsten durch den Erregerstrom ist gering.

1.1.4. Die 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 (Abb. 4).

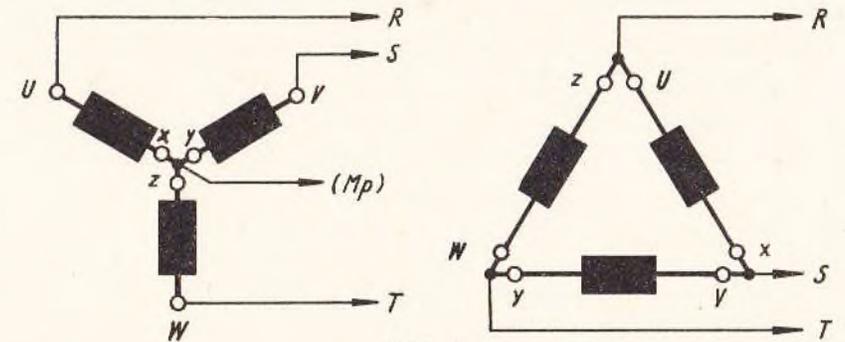
Die Erzeugung und die Eigenschaften des Drehstroms sind bereits im Teil 1 des Bandes B 4 besprochen worden.



(Abb. 4)

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 folgende zwei Schaltungsarten am meisten gebräuchlich sind.

Die Sternschaltung und die Dreieckschaltung



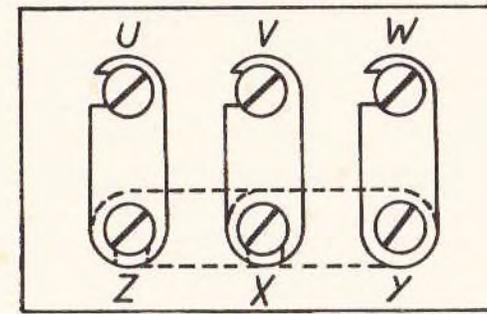
(Abb. 5)

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. 6 zeigt das Klemmenbrett einer Drehstrommaschine.

Klemmenbrett einer Drehstrommaschine



(Abb. 6)

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 sterngeschaltet. Bei senkrechter Stellung der Laschen ergibt sich dagegen die Dreieckschaltung. Die Anschlußlei-

tungen werden mit R, S und T bezeichnet. Wird der Mittelpunktleiter bei Sternschaltung mitgeführt, 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

1.1.4.1. 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 EMK abhängt. Das sind

1. die Bewegungsgeschwindigkeit (Drehzahl),
2. die wirksame Länge des Leiters (Windungszahl) und
3. 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.

1.1.5. Die Gleichstromerzeugung

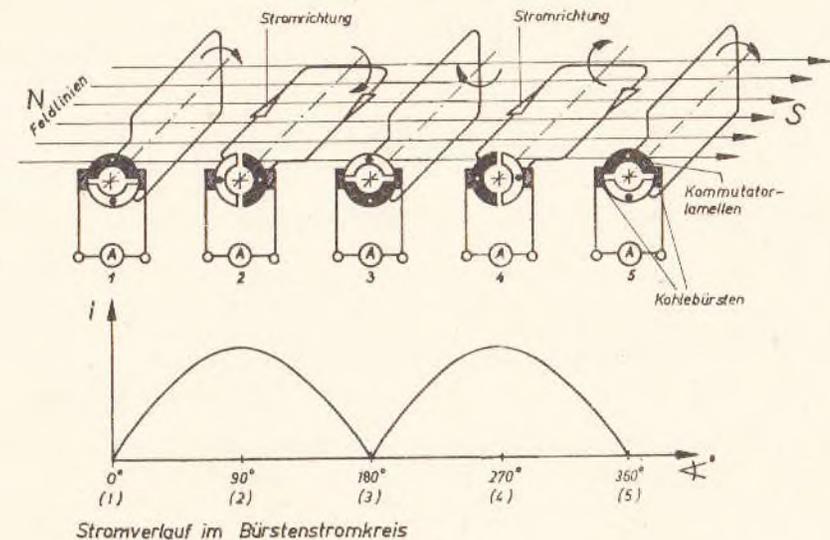
Bei der Drehung einer Leiterschleife im Magnetfeld wird eine Wechselspannung bzw. ein Wechselstrom erzeugt.

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:

Die Abb. 7 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 Stromes bestimmen. Verfolgt man nun die Richtung des Stromes, 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 Wechselstromes eine Umpolung der Schleife. Er stellt eine Art mechanischer

Wirkungsweise des Stromwenders



(Abb. 7)

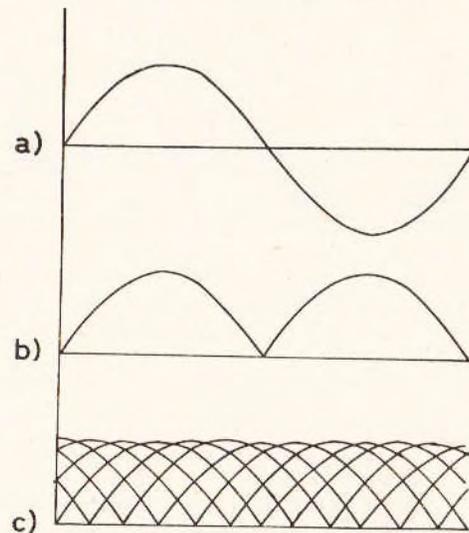
Gleichrichter dar. Die Halbwellen des Wechselstroms werden dadurch immer in gleicher Richtung in den äußeren Stromkreis geleitet. Wegen der erforderlichen Stromwendung können Gleichstromgeneratoren nur als Außenpolmaschine gebaut werden. Der durch den Stromwender einer Schleife abgeleitete Strom ist 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. 8 verdeutlicht den Vorgang; hierbei zeigt:

- a) den in einer gedrehten Leiterschleife erzeugten Wechselstrom;
- b) den durch den Stromwender gleichgerichteten Wechselstrom (pulsierender Gleichstrom) und
- c) 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,

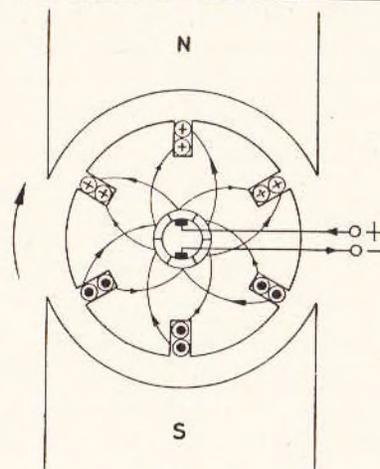
Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom



(Abb. 8)

da jeweils das Ende einer Wicklung mit dem Anfang einer anderen Wicklung zusammen an eine Lamelle gelötet wird (siehe hierzu Abb. 9).

Trommelanker mit Stromwender



(Abb. 9)

1.1.5.1. Gleichstromgeneratoren

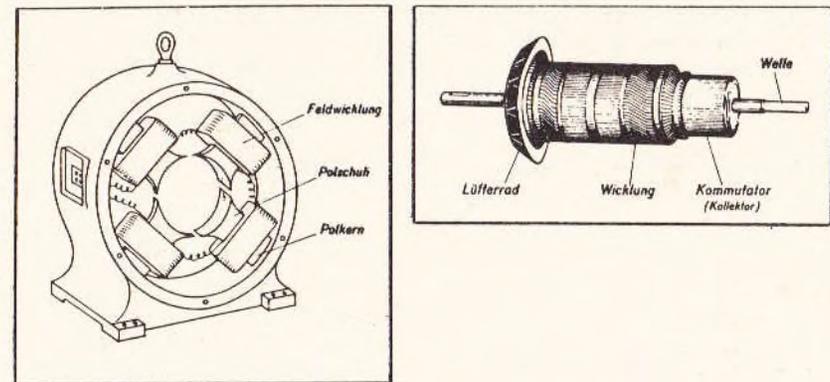
Da die Erzeugung elektrischen Stromes durch Induktion bei Wechsel- und Gleichstromgeneratoren grundsätzlich gleichartig ist, unterscheiden sie sich hauptsächlich durch ihre Stromabnahme vom Rotor, nämlich

Schleifringe beim Wechselstromgenerator und Stromwender (Kommutator) beim Gleichstromgenerator.

Für die Erregung des Magnetfeldes wird – wie wir wissen – 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.

Der Aufbau einer Gleichstrommaschine ist in Abb. 10 dargestellt. Er ist im Prinzip bei Gleichstromgeneratoren und -motoren gleich.

Aufbau einer Gleichstrommaschine



a) Stator

b) Rotor

(Abb. 10)

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:

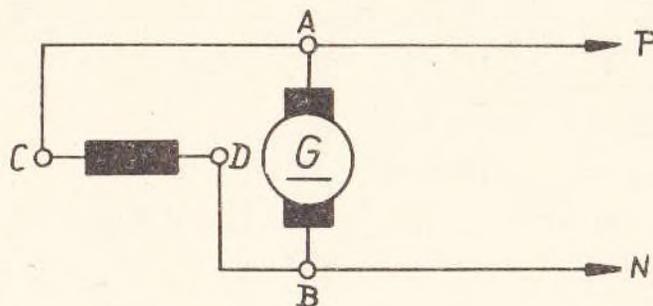
P-Leitung	—	rot
N-Leitung	—	blau.

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 Drehstrom-Generatoren 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) Funkse- und Funkempfangseinrichtungen geeignet.

Wechsel- oder Drehstromgeneratoren mit eingebautem Gleichrichter gewinnen z. B. auch im Kraftfahrzeugbau als sog. Lichtmaschinen immer mehr an Bedeutung.

Je nach Schaltung der Erregerwicklungen unterscheiden wir bei Gleichstrommaschinen allgemein drei Arten. Da diese Schaltungsarten sowohl für Generatoren als auch für Motoren gebräuchlich sind, können wir die folgenden drei Abbildungen auf Gleichstrommotoren (siehe hierzu Abschnitt 1.2.) sinngemäß anwenden.

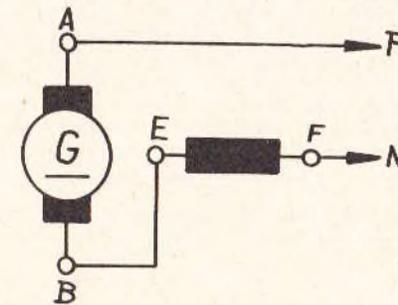
Nebenschlußmaschine



(Abb. 11)

Die Erregerwicklung liegt parallel zur Ankerwicklung, also im Nebenschluß.

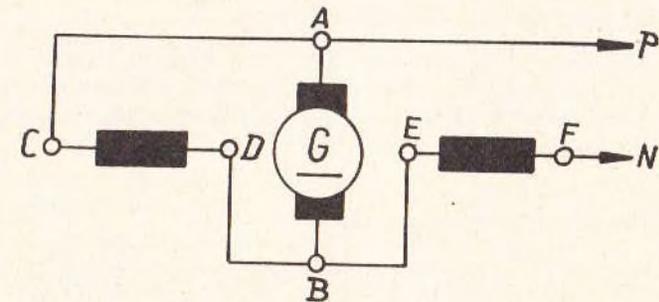
Hauptstrommaschine (auch Reihenschlußmaschine)



(Abb. 12)

Die Erregerwicklung liegt in Reihe mit der Ankerwicklung und wird vom Hauptstrom durchflossen.

Doppelschlußmaschine (auch Verbundmaschine)



(Abb. 13)

Es sind zwei Erregerwicklungen vorhanden, von denen eine im Nebenschluß, die andere in Reihe zur Ankerwicklung liegt.

1.1.5.2. Eigenschaften der verschiedenen Gleichstromgeneratoren

1.1.5.2.1. Nebenschlußgenerator

Da bei ihm die Erregerwicklung parallel zur Ankerwicklung liegt, wird bei Belastung des Nebenschlußgenerators mit dem Absinken der Klemmenspannung auch die Spannung an der Nebenschlußwicklung und damit auch der Erregerstrom kleiner. Die Klemmenspannung des Nebenschlußgenerators sinkt bei seiner Belastung. Man spricht von einer „weichen Charakteristik“. Das Absinken der EMK läßt sich durch

Verringerung des Regelwiderstandes im Erregerstromkreis ausgleichen. Der Nebenschlußgenerator ist zur Gleichstromerzeugung am meisten gebräuchlich.

1.1.5.2.2. Hauptstromgenerator

Die Erregerwicklung wird vom gesamten Strom durchflossen. Bei Belastung des Hauptstromgenerators wird das Erregerfeld verstärkt, die Klemmenspannung steigt. Andererseits ist die Klemmenspannung des unbelasteten Generators fast 0, da dann kein Strom durch die Erregerwicklung fließt.

Die Klemmenspannung des Hauptstromgenerators ist also sehr stark belastungsabhängig. Darum werden zur Gleichstromerzeugung Hauptstromgeneratoren im allgemeinen nicht verwendet.

1.1.5.2.3. Doppelschlußgenerator

Je nach Bemessung von Nebenschluß- und Hauptstrom-Erregerwicklungen kann man seine Eigenschaften konstruktiv ganz nach Belieben festlegen. Man kann also erreichen, daß seine Klemmenspannung mit zunehmender Belastung fällt, gleichbleibt oder steigt. Da der Doppelschlußgenerator sich für einen Parallelbetrieb mit anderen Generatoren schlecht eignet, findet man ihn lediglich in Anlagen mit nur einem Generator.

1.1.5.3. Regelung der Gleichstromgeneratoren

Wie bei Wechselstromgeneratoren wird auch hier im allgemeinen die Höhe der erzeugten EMK durch die Änderung des Erregerstromes geregelt. Zur Regelung der Gleichstromgeneratoren wird allerdings fast nur die Nebenschlußwicklung herangezogen.

1.1.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.1.

1. Von welchen Größen hängt die in einer im Magnetfeld gedrehten Leiterschleife erzeugte Induktionsspannung ab? 2. Wie läßt sich die Richtung des Induktionsstromes bzw. der Induktionsspannung bestimmen? 3. Welche Stromart wird grundsätzlich in einer im Magnetfeld gedrehten Leiterschleife erzeugt? 4. Wie wird die elektrische Energie von der gedrehten Schleife abgegriffen? 5. Was versteht man unter dem Stator bzw. Rotor einer elektrischen Maschine? Wie werden diese Grundbestandteile der Maschine sonst noch bezeichnet? 6. Beschreiben Sie den grundsätzlichen Aufbau eines Kurbelinduktors! 7. Aus welchen Gründen werden in Generatoren nicht Dauermagnete, sondern Elektromagnete zur Erzeugung eines Magnetfeldes verwendet? 8. Skizzieren Sie schematisch den Aufbau einer Außenpol- und einer Innenpolmaschine! 9. Warum werden Wechsel- und Drehstromgeneratoren als Innenpolmaschinen gebaut? 10. Wie ist ein Drehstromgenerator grundsätzlich aufgebaut? 11. Welche Klemmenbezeichnungen sind für die drei Wicklungen eines Drehstromgenerators gebräuchlich? 12. Skizzieren Sie die Sternschaltung und die Dreieckschaltung für Drehstromgeneratoren! 13. Wie kann die Höhe der erzeugten Spannung in Generatoren geregelt werden? 14. Durch welchen Kunstgriff erreicht man, daß einem Generator Gleichstrom entnommen werden kann, obgleich in einer gedrehten Leiterschleife grundsätzlich Wechselstrom erzeugt wird? 15. Was versteht man unter einem Trommelanker und was erreicht man mit ihm? 16. Was versteht man unter dem dynamoelektrischen Prinzip bei Gleich-

stromgeneratoren? 17. Skizzieren Sie die Schaltbilder für eine Nebenschlußmaschine, eine Hauptstrommaschine und eine Doppelschlußmaschine! 18. Warum können Gleichstromgeneratoren nur als Außenpolmaschinen gebaut werden? 19. Durch welches bauliche Merkmal unterscheiden sich am deutlichsten Drehstrom/Wechselstrom-Maschinen von Gleichstrommaschinen? 20. Warum muß vor allem der Eisenkern des Ankers auch bei Gleichstrommaschinen aus Dynamoblechen hergestellt werden?

1.2. 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.

1.2.1. Entstehung eines Drehmoments

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm durch die Änderung des magnetischen Flusses eine EMK erzeugt. Dieser Vorgang ist umkehrbar:

Legen wir an einen Leiter eine EMK, 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

- a) der Stärke des stehenden magnetischen Feldes (Induktion B),
- b) der Stromstärke im Leiter und
- c) der wirksamen Länge des Leiters im magnetischen Feld (Windungszahl).

Ordnen wird an Stelle 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 Teil I des Bandes B 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 Stromes in der Spule kann durch einen Stromwender (Kommutator) vorgenommen werden. Der Stromwender hat im Motor die Wirkungsweise eines mechanischen Wechselrichters.

1.2.2. Die gegenelektromotorische Kraft beim Motor

Wird eine stromdurchflossene Leiterschleife in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihr auch eine EMK erzeugt. Wenden wir die beiden Regeln an:

- a) für die Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld (Linke-Hand-Regel) und
- b) für die Richtung der Induktions-EMK 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 EMK erzeugt wird, die der angelegten Spannung entgegengesetzt gerichtet ist. Die Höhe der Gegen-EMK hängt von der Bewegungsgeschwindigkeit oder Drehzahl der Leiterschleife ab. Wird der Motor belastet, also gebremst, so sinkt die Drehzahl und die Gegen-EMK. Als treibende Spannung ist für den Motorstrom daher immer nur die Differenz zwischen angelegter Spannung und Gegen-EMK wirksam. Bei Belastung des Motors wird diese Spannungsdifferenz infolge Absinkens der Drehzahl und der dadurch geringeren Gegen-EMK ansteigen, so daß auch die Stromaufnahme des Motors größer wird.

1.2.3. Aufbau und Schaltung 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 (vgl. hierzu Abb. 10). Auch bei Gleichstrommotoren gibt es je nach Zusammenschaltung der Wicklungen:

- a) Nebenschlußmotoren,
- b) Hauptstrommotoren und
- c) Doppelschlußmotoren.

Für diese drei Motorenarten gelten die Schaltbilder der Abb. 11 bis 13 sinngemäß. Lediglich im Ankersymbol (Wicklung A-B) ist das G (für Generator) durch ein M (für Motor) zu ersetzen.

1.2.3.1. Eigenschaften der verschiedenen Gleichstrommotoren

Nebenschlußmotor:

Drehzahl nur wenig belastungsabhängig. Anzugsdrehmoment verhältnismäßig gering. (Verwendung: Wo es auf möglichst konstante Drehzahl ankommt: Antrieb von Werkzeugmaschinen. Einankerumformern, Ruf- und Signalmaschinen.)

Hauptstrommotor:

Drehzahl stark belastungsabhängig („durchdrehen“ im Leerlauf!) Anzugsmoment verhältnismäßig groß. Darf nur unter Last laufen. (Verwendung: Wo es auf großes Anzugsdrehmoment ankommt: Straßenbahn, Elektrofahrzeuge, Kräne, Aufzüge.)

Doppelschlußmotor:

Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung etwa zwischen Nebenschluß- und Hauptstrommotor. Anzugsdrehmoment ebenfalls etwa zwischen dem des Nebenschluß- und dem des Hauptstrommotors. (Verwendung: Wo gutes Anzugsdrehmoment verlangt wird, aber der Motor nicht ständig belastet ist: Stanzen, Scheren, Walzenstraßen, Antrieb von Druckereimaschinen.)

1.2.4. Der 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 Statoreisenkern 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.)

1.2.5. Motoren für Dreh- und Wechselstrom

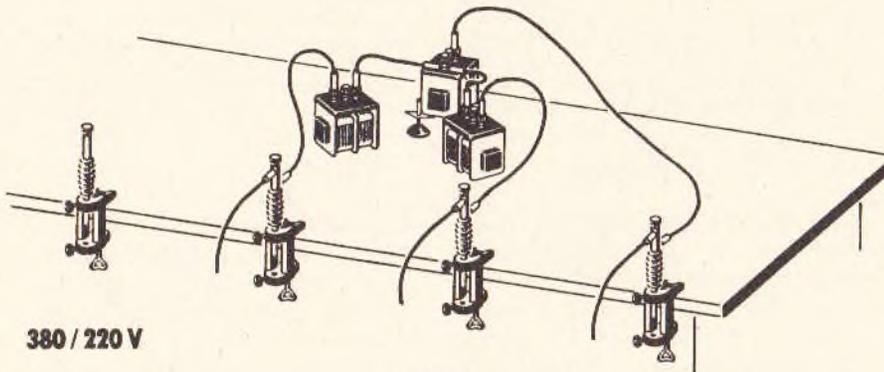
1.2.5.1. Das magnetische Drehfeld

Ordnet man nach Abb. 14 drei Spulen um je 120° gegeneinander ver setzt 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-Liniendiagrammes leicht erklären. Nach der Drehstrom-Phasenfolge erreichen 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.

Nachweis des Drehfeldes



(Abb. 14)

1.2.5.2. Der Synchronmotor für Drehstrom

Bringt man zwischen die Spulen (Abb. 14) 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 an Stelle 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 Kurzschlußwicklung auf dem Anker, wie sie beim Asynchron-Motor besprochen wird.

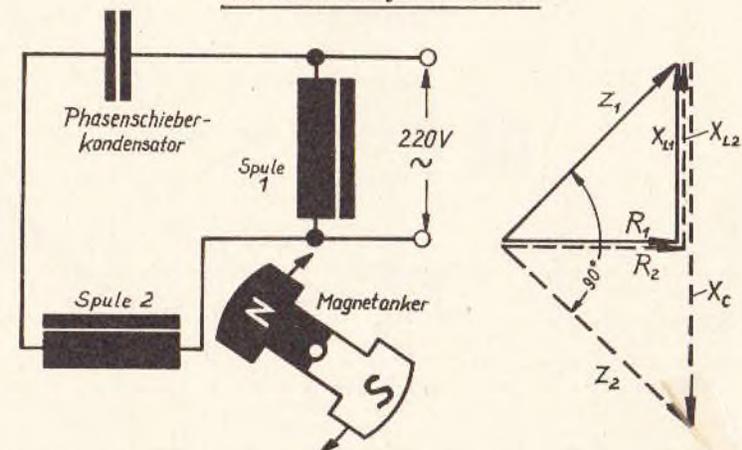
1.2.5.3. Der Synchronmotor für Wechselstrom

Bei Einphasen-Wechselstrom läßt sich mit Hilfe einer Phasenverschiebung ein Drehfeld erzeugen. Man ordnet dazu zwei Wicklungen um 90° gegeneinander versetzt an und erzeugt durch Vorschalten eines Kondensators zu einer der Wicklungen eine Phasenverschiebung des Stromes um 90° gegenüber dem Strom in der anderen Wicklung (Abb. 15).

Führt man zwei um 90° versetzten Spulen zwei Wechselströme zu, die ebenfalls um 90° phasenverschoben sind, so ergibt sich ein magnetisches Drehfeld.

Der Synchronmotor für Wechselstrom unterscheidet sich also vom Drehstromsynchronmotor nur durch die Spulenanordnung und den Phasenschieberkondensator. Abb. 15 zeigt die Schaltung und das zugehörige Zeigerdiagramm.

Wechselstromsynchronmotor



(Abb. 15)

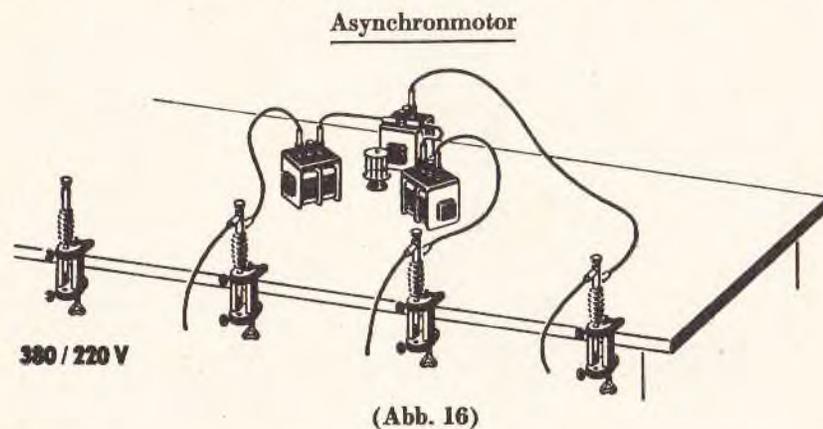
Man bezeichnet den Spulenstromkreis mit dem Phasenschieberkondensator auch als Hilfsphase.

1.2.5.4. Eigenschaften und Anwendung des Synchronmotors

Der bestechende 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.

1.2.5.5. 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 Drehfeld 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. 16. 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.



Beim Einschalten des Stromes beginnt sich der Kurzschlußanker zu drehen. Vergleicht man die Drehzahl mit der Drehzahl eines Magnet-

ankers, 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.

1.2.5.6. Eigenschaften und Anwendung des Asynchronmotors

Der Asynchronmotor läuft beim Einschalten von selbst an. Er benötigt also nicht – wie der Synchronmotor – besondere Anwurfvorrichtungen. Sein Kurzschlußanker kann sehr einfach und billig hergestellt werden: 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 Drehzahlschwankungen durch große Schwungmassen ausgeglichen.

1.2.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.2.

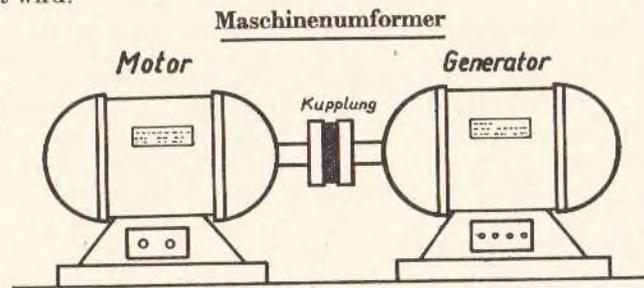
1. Von welchen Größen hängt die Kraft ab, mit der ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld bewegt wird?
2. Wie läßt sich die Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld bestimmen?
3. Wie erreicht man die fortlaufende Drehbewegung einer stromdurchflossenen Leiterschleife im Magnetfeld?
4. Wieso entsteht in einem Elektromotor eine Gegen-EMK? Wovon hängt sie ab?
5. Wie wirkt sich die Gegen-EMK auf die Stromaufnahme des Motors aus?
6. Welche Eigenschaft ist maßgebend für die Verwendung eines Nebenschlußmotors als Antrieb für die Ruf- und Signalmaschine?
7. Was versteht man unter einem Universalmotor? Wie ist er aufgebaut?
8. Was versteht man unter einem magnetischen Drehfeld? Wie kann es bei Drehstrom bzw. Wechselstrom erzeugt werden?
9. Wie ist ein Synchronmotor grundsätzlich aufgebaut?
10. Welche Haupteigenschaften besitzt ein Synchronmotor? Für welche Zwecke wird er verwendet?
11. Welchen

¹⁾ asynchron = nicht im Gleichlauf

Zweck erfüllt die sog. Hilfsphase bei einem Synchronmotor für Wechselstrom? 12. Wie kann man erreichen, daß ein Synchronmotor selbständig anläuft? 13. Wodurch unterscheiden sich Synchron- und Asynchronmotor in ihrem Aufbau? 14. Aus welchem Grund muß die Drehzahl eines Kurzschlußankers beim Asynchronmotor zwangsläufig geringer sein als die Drehzahl des magnetischen Drehfeldes? 15. Welche Vor- und Nachteile besitzt ein Asynchronmotor? 16. Wo findet der Asynchronmotor Verwendung?

1.3. 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. 17)

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 Maschinenumformer wirtschaftlicher. Sie werden in vielen Zweigen der Fernmeldetechnik eingesetzt.

1.3.1. Einankerumformer / Ruf- und Signalmaschine (RSM)

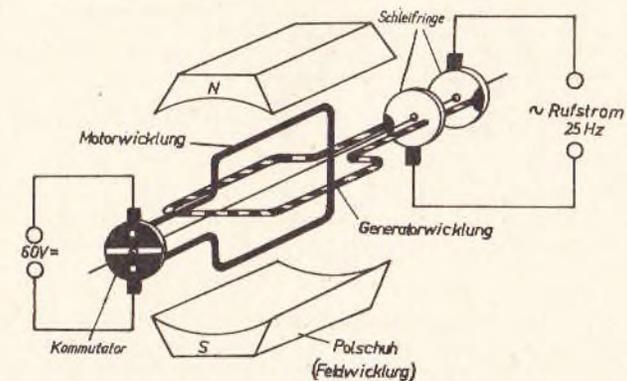
Antriebsmotor und Generator brauchen nicht unbedingt in zwei getrennte Maschinengehäuse eingebaut zu werden. Man kann Motor und Generator in einer Maschine vereinigen, indem man auf einem Anker sowohl die Motorwicklung als auch die Generatorwicklung unterbringt. Da diese Umformer nur einen Anker besitzen, nennt man sie Einankerumformer.

Die Ruf- und Signalmaschinen der Wählvermittlungsstellen 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. 18 wird die Rufstromerzeugung veranschaulicht.

Erzeugung des 25-Hz-Rufstromes in der RSM



(Abb. 18)

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

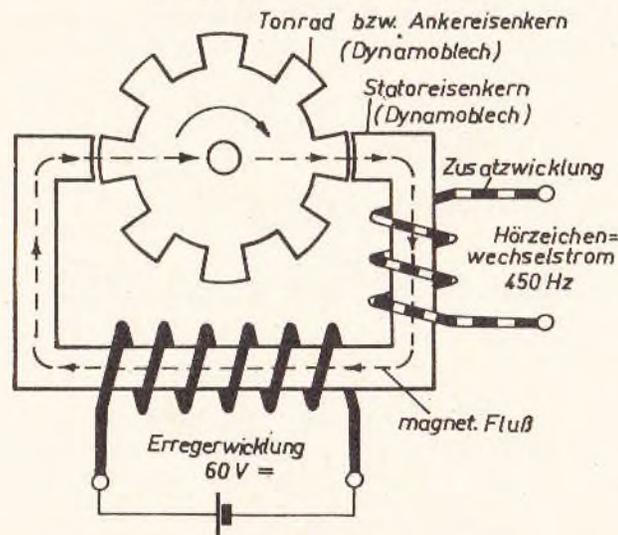
ist, muß die Drehzahl des Ankers zur Erzeugung eines Wechselstromes mit der Frequenz 25 Hz nach der im Teil 1 des Bandes B 4 abgeleiteten Formel

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{25 \cdot 60}{1} = 1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

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).

Hörtonerzeugung in der RSM



(Abb. 19)

Infolge der Änderung des magnetischen Flusses wird in einer zusätzlich auf den feststehenden Eisenkern aufgebrauchten Hörtonwicklung ein Wechselstrom induziert. Die Frequenz des erzeugten Wechselstromes hängt von der Drehzahl des Tonrades 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

$$z = p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{450 \cdot 60}{1500} = 18 \text{ Zähne}$$

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.

1.3.2. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1.3.

1. Was versteht man unter einem Maschinenumformer? 2. Wie ist ein Maschinenumformer grundsätzlich aufgebaut? 3. Für welche Zwecke werden Maschinenumformer verwendet? 4. Was versteht man unter einem Einankerumformer? 5. Welche Stromarten werden in der Ruf- und Signalmaschine einer Wählvermittlung erzeugt? 6. Beschreiben Sie die Rufstromerzeugung in der RSM! 7. Woran kann man am einfachsten die Antriebsseite (Motor) und die Generatorseite bei einer RSM erkennen? 8. Wie groß muß die Drehzahl der RSM sein, wenn sie ein Polpaar besitzt und einen Rufwechselstrom von 25 Hz erzeugen soll? 9. Skizzieren und erläutern Sie das Tonrad-Prinzip, das zur Hörtonerzeugung in der RSM dient! 10. Warum kann der Hörton 450 Hz nicht einfach durch eine Zusatzwicklung auf dem Anker erzeugt werden?

2. Transformatoren/Fernmeldeübertrager

2.1. Starkstromtransformatoren

2.1.1. Wirkungsweise und Anwendung des Transformators

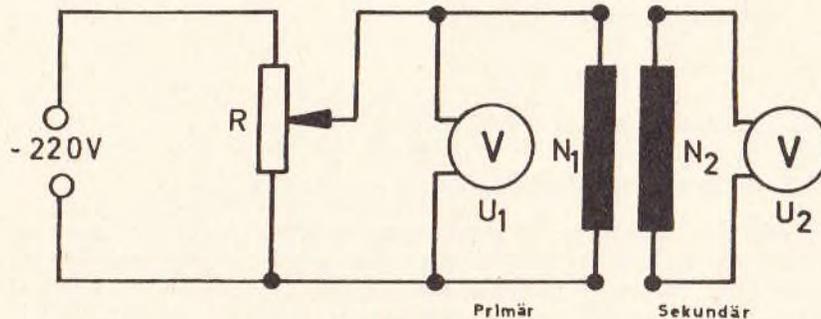
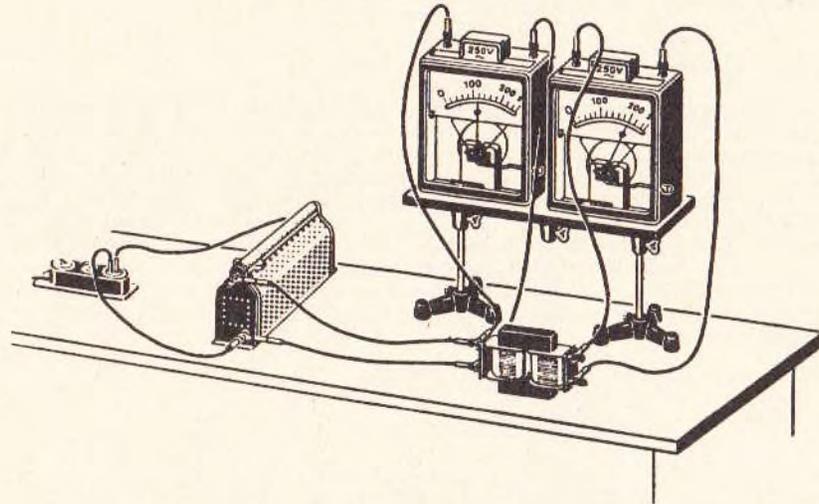
Da seine Wirkungsweise auf den Vorgängen der Induktion beruht, ist ein Transformator nur für Wechselstrom oder schwankenden Gleichstrom anwendbar. Er besteht grundsätzlich aus zwei Wicklungen, die sich auf einem geschlossenen Eisenkern aus Transformatorenblechen befinden.

2.1.1.1. Das Verhältnis der Spannungen

In einem Versuch nach Abb. 20 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 aufgesteckt, der durch ein Joch geschlossen wird. Zur Verminderung von Wirbelströmen muß der Eisenkern geblättert sein. Die eine Spule mit der Windungszahl N_1 liegt über dem Spannungsteiler R an der Netzwechselspannung von 220 Volt, außerdem sind Anfang und Ende der Spule mit einem Spannungsmesser verbunden. 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** und die an ihr gemessene

Das Verhältnis der Spannungen



(Abb. 20)

Spannung heißt **Primärspannung**, den in ihr fließenden Strom bezeichnet man mit **Primärstrom**.

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

Durch den geschlossenen Eisenkern ist ein geschlossener Feldlinienweg 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

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 Teil I dieses Handbuchs abgeleiteten Formel für die Höhe der Induktionsspannung der Ruhe beweisen. Für die Höhe der Selbstinduktionsspannung in der Primärwicklung gilt

$$E_1 = \Phi \cdot N_1 \cdot f \cdot 4,44$$

und für die Höhe der Induktionsspannung in der Sekundärwicklung

$$E_2 = \Phi \cdot N_2 \cdot f \cdot 4,44.$$

Somit beträgt das Verhältnis der Spannungen:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\Phi \cdot N_1 \cdot f \cdot 4,44}{\Phi \cdot N_2 \cdot f \cdot 4,44}$$

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:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

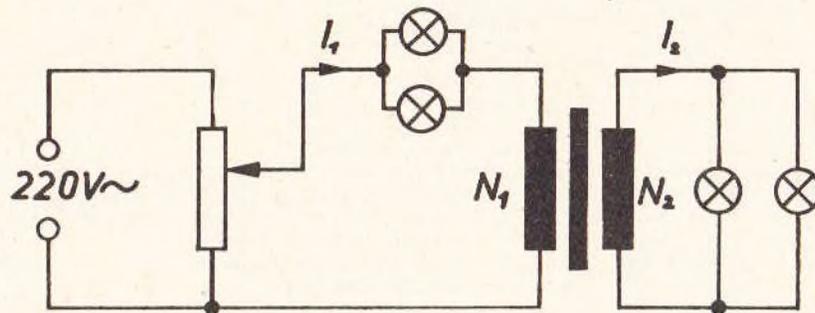
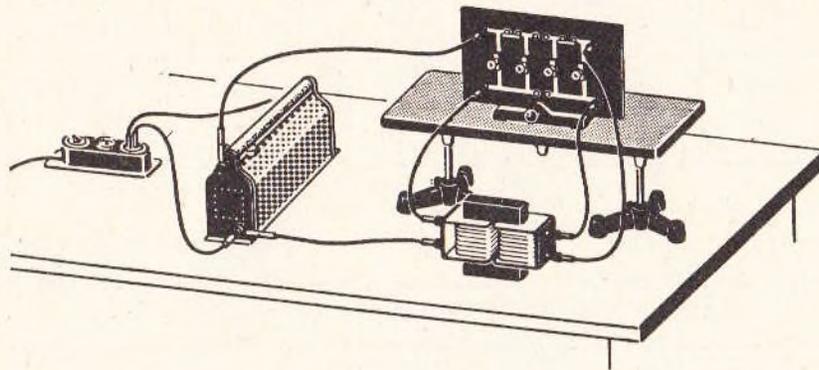
2.1.1.2. Das Verhältnis der Ströme

Zu Beginn eines jeden Versuchs nach Abb. 21 wird der Spannungsteiler R auf Null gestellt und die vier Glühlampen fest in die Fassungen eingeschraubt. Wir verwenden die gleichen Spulen wie im Versuch nach Abb. 20.

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

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

Das Verhältnis der Ströme



(Abb. 21)

Beim Verhältnis 600 zu 1200 Wdgn regeln wir die Primärspannung so ein, daß die Primärlämpchen normal hell brennen. Nun brennen die Lämpchen des Sekundärkreises nur halb so hell. Wird eines von ihnen aus der Fassung geschraubt, brennt das andere genauso hell wie die Lämpchen im Primärkreis. (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 Teil 1 dieses Handbuchs 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:

$$P_1 = P_2$$

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

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

Aus unserer Tabelle können wir ferner ablesen:

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

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. 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: $U_1 = 500 \text{ V}; \quad U_2 = 230 \text{ V}; \quad N_1 = 250$

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: $U_1 = 6000 \text{ V}; \quad U_2 = 220 \text{ V}; \quad N_2 = 200$

Gesucht: $\bar{u}; \quad N_1$

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

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

$$N_1 = \frac{N_2 \cdot U_1}{U_2} = \frac{200 \cdot 6000 \text{ V}}{220 \text{ V}} = \underline{\underline{5460}}$$

Das Übersetzungsverhältnis des Transformators beträgt 27,3, die Primärwindungszahl muß 5460 betragen.

3. Beispiel:

Ein Transformator gibt sekundär eine Leistung $S_2 = 5 \text{ kVA}$ bei einer Spannung von 115 V ab. An der Primärseite werden 380 V zugeführt. Wie groß ist die Übersetzung und welcher Strom fließt primär und sekundär?

Gegeben: $S_2 = 5000 \text{ VA}; \quad U_1 = 380 \text{ V}; \quad U_2 = 115 \text{ V}$

Gesucht: $\bar{u}; \quad I_1; \quad I_2$

$$\text{Lösung: } \bar{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{115} = \underline{\underline{3,3}}$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2; \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{5000 \text{ VA}}{115 \text{ V}} = \underline{\underline{43,5 \text{ A}}}$$

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{5000 \text{ VA}}{380 \text{ V}} = \underline{\underline{13,2 \text{ A}}}$$

Das Übersetzungsverhältnis beträgt 3,3, der Primärstrom 13,2 A und der Sekundärstrom 43,5 A.

2.1.1.3. Der 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 Koerzitivkraft 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:

- a) Wirbelstromverluste werden durch möglichst feine Unterteilung des Eisenkerns in dünne sog. Transformatorbleche und gute Isolierung der einzelnen Bleche voneinander verringert.
- b) Ummagnetisierungsverluste sind wegen ihrer Abhängigkeit von der Koerzitivkraft materialbedingt. Für Transformatoren werden daher seit langem speziallegierte Eisenbleche mit sehr schmaler Hysteresis hergestellt.
- c) Kupferverluste können durch Verringerung des Wicklungswiderstandes 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.
- d) Streuverluste lassen sich durch besondere Bauarten und Wicklungsanordnungen im Transformator verringern.

Die Verluste (außer Streuverlusten) 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:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_s}{P_p} = \frac{P_2}{P_1}$$

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 (siehe hierzu „Die Leistung im Wechselstromkreis“ im Teil 1 dieses Handbuchs). 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?

$$\text{Gegeben: } U_1 = 220 \text{ V; } U_{21} = 250 \text{ V; } I_{21} = 100 \text{ mA;} \\ U_{22} = 6,3 \text{ V; } I_{22} = 5 \text{ A; } \eta = 0,9$$

$$\text{Gesucht: } S_2; S_1; I_1$$

$$\text{Lösung: a) } S_2 = S_{21} + S_{22} \\ S_{21} = U_{21} \cdot I_{21} \\ = 250 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A} = \underline{25 \text{ VA}}$$

$$S_{22} = U_{22} \cdot I_{22} \\ = 6,3 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = \underline{31,5 \text{ VA}}$$

$$S_2 = 25 \text{ VA} + 31,5 \text{ VA} = \underline{\underline{56,5 \text{ VA}}}$$

Die Nennleistung beträgt 56,5 VA

$$\text{b) } \eta = \frac{S_2}{S_1}$$

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$$

$$S_1 = \frac{56,5 \text{ VA}}{0,9} = \underline{\underline{62,8 \text{ VA}}}$$

Der Transformator nimmt eine Leistung von 62,8 VA auf.

$$\text{c) } S_1 = U_1 \cdot I_1$$

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1}$$

$$I_1 = \frac{62,8 \text{ VA}}{220 \text{ V}} = \underline{\underline{0,285 \text{ A}}}$$

Die Stromaufnahme des Transformators beträgt 0,285 A.

2.1.1.4. Die 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:

$$A_{\text{Eisen}} = \sqrt{S_1} \\ (\text{cm}^2) \quad (\text{VA})$$

Der Eisenquerschnitt muß also der Wurzel aus der Primärleistung entsprechen. Wird die Primärleistung in VA eingesetzt, ergibt sich der Eisenquerschnitt in cm^2 . 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

$$\text{Lösung: } \eta = \frac{S_2}{S_1}$$

$$S_2 = \eta \cdot S_1$$

$$S_1 = A_{Fe}^2$$

$$= 15^2 = \underline{225 \text{ VA}}$$

$$S_2 = 0,95 \cdot 225 = \underline{214 \text{ VA}}$$

Dem Transformator darf eine Leistung (Nennleistung) von 214 VA entnommen werden.

2.1.1.5. 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 $E = \Phi \cdot N \cdot f \cdot 4,44$ für die Netzfrequenz 50 Hz und eine magnetische Induktion von maximal etwa 11000 Gauß entwickelt worden:

$$N_1 = \frac{40 \cdot U_1}{A_{Fe}}$$

wobei

$N_1 =$ Primärwindungszahl,

$N_2 =$ Sekundärwindungszahl,

$U_1 =$ Primärspannung in V,

$U_2 =$ Sekundärspannung in V,

$A_{Fe} =$ Eisenquerschnitt in cm^2 .

$$N_2 = \frac{42 \cdot U_2}{A_{Fe}}$$

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.

Wie viele 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

$$\text{Lösung: } N_1 = \frac{40 \cdot U_1}{A_{Fe}}$$

$$A_{Fe} = \sqrt{S_1}$$

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$S_2 = 24 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} = 48 \text{ VA}$$

$$S_1 = \frac{48 \text{ VA}}{0,85} = 56,5 \text{ VA}$$

$$A_{Fe} = \sqrt{56,5} = 7,52 \text{ cm}^2, \text{ gewählt } \underline{8 \text{ cm}^2}$$

$$N_1 = \frac{40 \cdot 220}{8} = \underline{1100}$$

$$N_2 = \frac{42 \cdot U_2}{A_{Fe}}$$

$$N_2 = \frac{42 \cdot 24}{8} = \underline{126}$$

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 $3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$:

$$S = \frac{I}{A}$$

$$A = \frac{I}{S}$$

$$A_1 = \frac{I_1}{S} = \frac{0,257}{3} = 0,0856 \approx \underline{0,09 \text{ mm}}$$

$$A_2 = \frac{I_2}{S} = \frac{2}{3} = 0,667 \approx \underline{0,7 \text{ mm}}$$

2.1.1.6. Die 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.

2.1.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Transformators

Grundsätzlich besteht ein Transformator aus zwei Wicklungen, der Primär- und der Sekundärwicklung, die auf einem gemeinsamen Eisenkern aus Transformatorblechen untergebracht sind. Den Wicklungen entsprechend werden auch die Windungszahlen, Spannungen und Ströme bezeichnet:

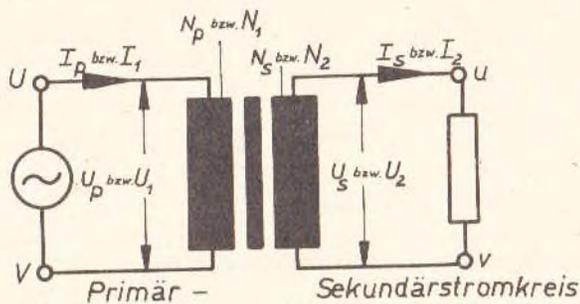
Zur Primärwicklung gehören

Primärwindungszahl	N_p	oder	N_1 ,
Primärspannung	U_p	oder	U_1 ,
Primärstrom	I_p	oder	I_1 .

Zur Sekundärwicklung gehören

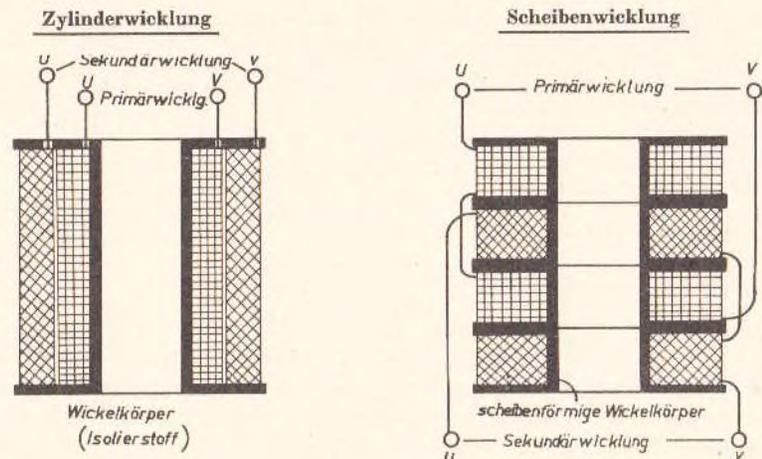
Sekundärwindungszahl	N_s	oder	N_2 ,
Sekundärspannung	U_s	oder	U_2 ,
Sekundärstrom	I_s	oder	I_2 .

Grundsätzliches Schaltbild eines Transformators



(Abb. 22)

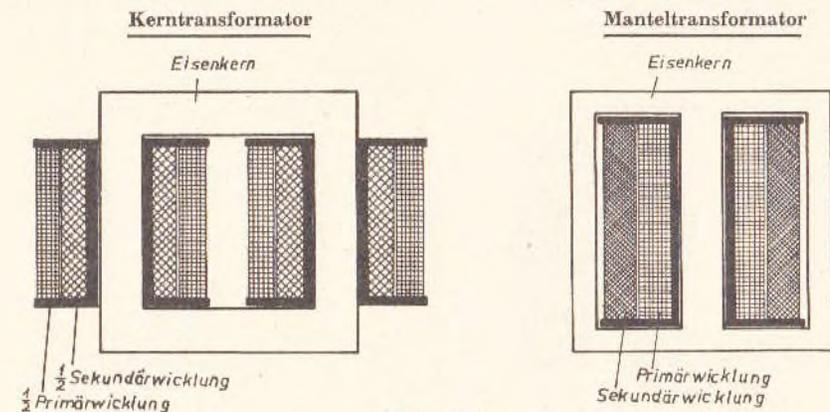
Bei den verschiedenen Bauarten von Transformatoren muß man unterscheiden nach der Art der Wicklungsanordnung:



(Abb. 23)

Die Zylinderwicklung ist am einfachsten herstellbar. Da bei ihr die Windungen lagenweise herauf- und heruntergewickelt werden, ist die Spannung zwischen den einzelnen Drahtlagen u. U. sehr hoch. Je mehr Lagen bei der Zylinderwicklung übereinandergewickelt werden, desto größer werden die Streuverluste, da die äußeren Lagen schon in größerer Entfernung vom Eisenkern liegen.

Bei der Scheibenwicklung wird die Wicklung in einzelnen Scheiben getrennt hergestellt und dann zu einer Wicklung zusammengefaßt. Manchmal werden – wie die Abb. zeigt – Primär- und Sekundärwicklung ineinander verschachtelt. Das ergibt einen guten Wirkungsgrad, da hier die Streuverluste und die Lagenspannung gering sind. Zudem lassen sich schadhafte Wicklungsteile durch Auswechseln einzelner Scheiben einfacher reparieren. Vielfach werden auch Scheibenwicklung (Hochspannungsseite) und Zylinderwicklung (Niederspannungsseite) in einem Transformator angewendet. Nach der Form des Eisenkerns unterscheidet man zwischen



(Abb. 24)

Beim Kerntransformator werden Primär- und Sekundärwicklung je zur Hälfte auf einem Schenkel des Eisenkerns untergebracht. Die Wicklung wird dadurch – vor allem, wenn sie Anzapfungen erhalten muß – aufwendiger in der Herstellung. Der Kerntransformator weist jedoch gegenüber dem Manteltransformator geringere Streuverluste auf.

Der Manteltransformator besitzt nur einen Wickelkörper. Die Wicklungen sind daher einfacher und billiger in der Herstellung. Nachteilig ist der größere Streuverlust. Beim Manteltransformator ist zu beachten, daß der Eisenquerschnitt der beiden äußeren Schenkel nur halb so groß zu sein braucht wie der Querschnitt des mittleren, da sich der magnetische Fluß teilt.

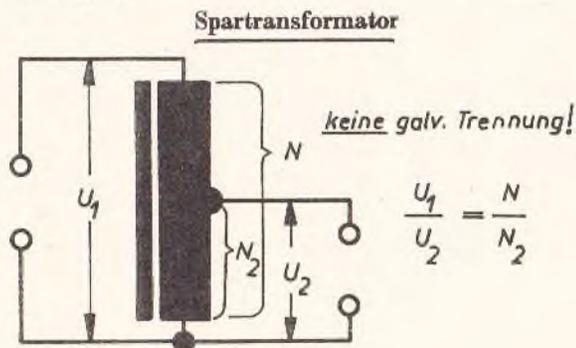
2.1.3. Der Schutztransformator

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 unter Betrieb durchgemessen werden können.

2.1.4. Der Spartransformator

Eine besondere Bauart ist der sog. Spartransformator. Er arbeitet etwa wie ein Spannungsteiler.



(Abb. 25)

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 nur mit einem Übersetzungsverhältnis zwischen 1:1 und 1:2 hergestellt.

2.1.5. 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.

2.1.6. 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.

2.1.7. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.

1. Warum ist ein Transformator nur für Wechselstrom anwendbar? 2. Wie verhalten sich die Spannungen und Ströme von Primär- und Sekundärseite bei einem Transformator? 3. Welche Aufgaben hat der Transformator in der Starkstromtechnik zu erfüllen? 4. Welcher Art sind die in einem Transformator auftretenden Verluste, und welche Ursache haben sie? 5. Wie kann man die Verluste in einem Trans-

formator gering halten? 6. Wie äußern sich die Verluste an einem Transformator? 7. Was versteht man unter der Nennleistung eines Transformators? 8. Warum wird die Nennleistung in Voltampere angegeben? 9. Mit welcher Faustformel kann man den erforderlichen Eisenquerschnitt für einen Transformator bestimmen? 10. Skizzieren Sie die Wicklungsarten Zylinder- und Scheibenwicklung! 11. Welche Vor- und Nachteile haben die beiden Wicklungsarten? 12. Skizzieren Sie einen Kern- und einen Manteltransformator! 13. Welche Aufgabe hat ein Schutztransformator? 14. Was versteht man unter einem Spartransformator? 15. Warum ist die Anwendung eines Spartransformators unter Umständen gefährlich? 16. Für welche Zwecke werden Meßwandler verwendet? 17. Wie kann man Drehstrom transformieren? 18. Der Netztransformator eines Netzspeisegeräts hat einen Eisenkernquerschnitt von 8 cm^2 . Der Transformatorwirkungsgrad beträgt 0,88. Wie groß ist die Nennleistung des Transformators?

2.2. Der Übertrager in der Fernmeldetechnik

2.2.1. 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 hauptsächlichlichen Anwendungsgebiete des Übertragers sind:

a) 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. Näheres hierzu siehe unter „Leitungstechnik“.)

b) 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.)

c) 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. Näheres hierzu siehe unter „Mehrfachausnutzung von Leitungen“.)

2.2.2. Aufbau und Wicklungsanordnung des Übertragers

Den Anwendungsgebieten entsprechend muß der Übertrager besondere Konstruktionsmerkmale aufweisen.

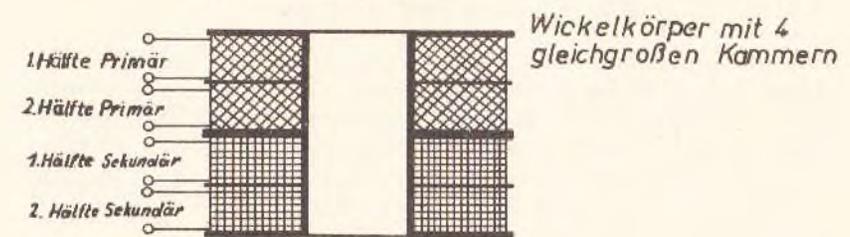
Da Nachrichtenwechselströme eine höhere Frequenz aufweisen als der technische Wechselstrom (50 Hz), treten wegen der schnelleren Änderung des magnetischen Flusses im Eisenkern auch höhere Wirbelstromverluste auf. Zur Verminderung dieser Wirbelstromverluste müssen die Transformatorbleche noch erheblich 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 Stoßflugen ein flaches Stück Isolierstoff gelegt.

Um den Übertrager für Phantomschaltungen verwenden zu können, müssen Primär- und Sekundärwicklung je in zwei elektrisch genau gleiche Wicklungshälften unterteilt werden. Dabei müssen Windungszahl,

Kammerwicklung bei einem Übertrager



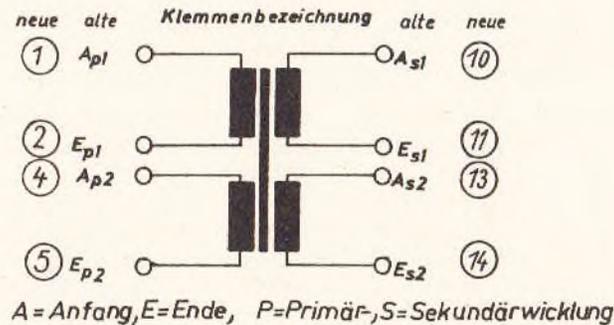
(Abb. 26)

Drahtwiderstand, Wicklungsinduktivität und Wicklungskapazität für jede Wicklungshälfte einer Seite genau übereinstimmen. Absolute Wicklungssymmetrie wäre mit einer einfachen Zylinderwicklung nicht möglich, da die äußere Wicklung wegen des größeren Wicklungsdurchmessers einen größeren Wirkwiderstand 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 wickelt in einen Spulenkörper mit sog. Kammern, so daß für jede Wicklungshälfte der gleiche Wickelraum zur Verfügung steht (Abb. 26). Das entspricht im Prinzip der Scheibenwicklung.

Die Wicklungsabschlüsse tragen auf den Übertragern bestimmte Bezeichnungen, die in Abb. 27 angegeben sind.

Klemmenbezeichnung beim Leitungsübertrager



(Abb. 27)

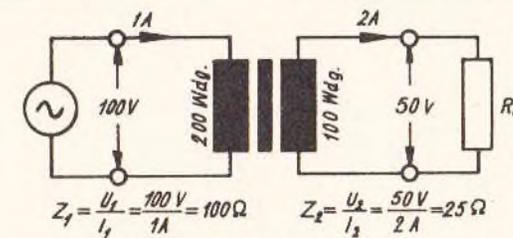
Um den Übertrager hochspannungssicher zu machen, sind die Wicklungen besonders sorgfältig isoliert.

2.2.3. 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. 28 abgeleitet.

Wir wählen dazu einen Transformator mit einer Primärwindungszahl von 200 und einer Sekundärwindungszahl von 100 Wdg. Legen wir an die Primärwicklung eine Spannung von 100 V, so muß an der Sekundärwicklung nach den im Abschnitt Starkstromtransformatoren gewonnenen Erkenntnissen eine Spannung von 50 V abgegeben werden (die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen). Wird dem Transformator ein Strom von 2 A entnommen, so muß in der Primärwicklung ein Strom

Windungszahlen- und Widerstandsübersetzungsverhältnis



(Abb. 28)

von 1 A fließen (die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Spannungen!).

Aus dem Verhältnis Spannung durch Strom können wir den Eingangsscheinwiderstand Z_1 und den Ausgangsscheinwiderstand Z_2 des Transformators errechnen. Die Rechnung ergibt:

$$\text{Eingangsscheinwiderstand } Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ A}} = \underline{100 \Omega}$$

$$\text{Ausgangsscheinwiderstand } Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{50 \text{ V}}{2 \text{ A}} = \underline{25 \Omega}$$

Jetzt wollen wir vergleichen, wie sich die Windungszahlen und die Scheinwiderstände ein und desselben Transformators verhalten:

$$\text{Windungszahlen } \dot{u}_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{100} = \frac{2}{1} = \underline{\underline{2}}$$

$$\text{Scheinwiderstände } \dot{u}_Z = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{100}{25} = \frac{4}{1} = \underline{\underline{4}}$$

Daraus folgt:

Bei einem Übertrager ist das Übersetzungsverhältnis der Widerstände \dot{u}_Z gleich dem Quadrat des Windungszahlenverhältnisses \dot{u}_N .

In eine Formel gebracht ergibt sich:

$$\dot{u}_Z = \dot{u}_N^2$$

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: \dot{u}_Z

Lösung: $\dot{u}_Z = \dot{u}_N^2$

$$\dot{u}_N = \frac{N_1}{N_2}$$

$$= \frac{1550}{1000} = 1,55$$

$$\dot{u}_Z = 1,55^2 = \underline{\underline{2,4}}$$

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 b. 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 an Stelle 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.

2.2.4. Die Induktionsspule

Auch die Induktionsspule stellt ihrem Aufbau nach einen Übertrager dar. Sie ist Bestandteil eines Fernsprechapparats und übernimmt hier im wesentlichen zwei Aufgaben:

a) Galvanische Trennung

(Im Mikrofonstromkreis einer Fernsprechverbindung fließt Gleichstrom, der durch das Mikrofon beim Besprechen „moduliert“ wird. Das Ergebnis ist mit Wechselstrom überlagerter 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.)

b) 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! Näheres über die Rückhördämpfung siehe im Band C 4 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik – Buchreihe AFT“.)

Zur Vermeidung einer zu starken Gleichstromvormagnetisierung wird auch der Eisenkern der Induktionsspule mit einem Luftspalt im Eisenkern versehen.

2.2.5. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2.

1. Welchen Zwecken dient der Übertrager in der Fernmeldetechnik? 2. Aus welchem Grunde muß der Eisenkern eines Übertragers aus dünneren Blechen oder aus einem Massekern bestehen? 3. Warum muß der Eisenkern eines Übertragers einen Luftspalt haben? 4. Was versteht man unter dem Übersetzungsverhältnis eines Fernmeldeübertragers? 5. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Verhältnis der Windungszahlen und dem Verhältnis der Scheinwiderstände eines Übertragers? 6. Ein Übertrager hat eine Primärwindungszahl von 2828 und eine Sekundärwindungszahl von 2000. Welches Widerstands-Übersetzungsverhältnis ergibt sich? 7. Was bedeutet die Angabe 2:1 auf einem Übertrager und wie ist er zwischen Leitung und Amtseinrichtung zu schalten? 8. Aus welchem Grunde müssen die Wicklungen eines Leitungsübertragers besonders gut isoliert sein? 9. Warum darf man an Stelle eines Übertragers mit dem Übersetzungsverhältnis 1:2 nicht einfach einen mit dem Übersetzungsverhältnis 2:1 umgekehrt einschalten? 10. Welche Aufgabe erfüllt die Induktionsspule eines Fernsprechapparats?

3. Die Stromversorgung von Fernmeldeanlagen

3.1. Anforderungen an die Stromversorgung von Fernmeldeanlagen

Das Fernmeldeanlagenengesetz vom 14. Januar 1928 gibt dem Bund das ausschließliche Recht, Fernmeldeanlagen zu betreiben. Dieses Recht kann verliehen werden. Nach dem Postverwaltungsgesetz vom 24. Juli 1953 ist die Bundespost verpflichtet, die Fernmeldeanlagen technisch und betrieblich den Anforderungen des Verkehrs entsprechend weiter zu entwickeln und zu vervollkommen. Aufgrund dieser Gesetze ergibt sich die Forderung, daß in Krisen- und Katastrophenzeiten ein ungestörter Fernmeldeverkehr sichergestellt wird. Damit werden an die Stromver-

sorgung der Fernmeldeanlagen hohe Anforderungen in bezug auf die Betriebssicherheit gestellt.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden die Fernmeldeanlagen der Bundespost – von wenigen Ausnahmen abgesehen – aus dem öffentlichen Starkstromnetz versorgt. Je nach dem Energiebedarf erfolgt die Energieversorgung über Hoch- und Niederspannungsschaltanlagen oder normale Hausanschlüsse. Das öffentliche Netz wird mit Drehstrom bzw. Wechselstrom betrieben. Da eine absolut unterbrechungsfreie Stromversorgung durch das öffentliche Stromversorgungsnetz nicht sichergestellt werden kann und Fernmeldeanlagen zur Stromversorgung Gleichstrom benötigen, ist es notwendig, die bezogene elektrische Energie aufzubereiten, zu stabilisieren und durch zusätzliche betriebseigene Energiespeicher oder Netzersatzanlagen für eine unterbrechungsfreie Energieversorgung der Fernmeldeanlagen zu sorgen.

Insgesamt ergeben sich folgende Anforderungen an die Fernmelde-Stromversorgung:

a) Gleichstrom / Gleichspannung

(Zum Betrieb fast sämtlicher technischer Fernmeldeeinrichtungen wird Gleichstrom benötigt, z. B. als Mikrofonruhestrom, zum Betätigen von Relais und Wählern, zur Speisung von Verstärkerröhren und Transistoren.)

b) Unterbrechungsfreie Stromlieferung

c) Konstante Spannungen

(Um die einwandfreie Funktion der technischen Einrichtungen zu gewährleisten, ist die Einhaltung bestimmter oberer und unterer Grenzen für die Versorgungsgleichspannung erforderlich. Als Nennspannungen für Fernmeldeanlagen sind gebräuchlich:

24 V für Nebenstellenanlagen,

48 V für ESK¹⁾-Anlagen sowie elektronische Anlagen und

60 V für Wählervermittlungsstellen.

Daneben werden z. B. für Verstärkerämter noch weitere Versorgungsspannungen, wie 212-V-Anodenspannung, benötigt.)

d) Oberwellenfreie und störspannungsfreie Gleichspannung

(Wie wir noch bei der Beschreibung der Gleichrichterschaltungen feststellen werden, ist das Ergebnis einer Wechselstrom-Gleichrichtung zunächst pulsierender Gleichstrom. Dieser würde z. B. in Fernsprechstromkreisen einen starken „Brumm“ verursachen. Weiterhin können Störspannungen aus dem Netz induktiv oder kapazitiv in die Stromversorgung gelangen. Man fordert daher, daß z. B. der Oberwellen- und Störspannungsanteil

bei 60-V-Anlagen 2 mV,

bei 48-V-Anlagen 1,5 mV und

bei 24-V-Anlagen 1 mV nicht überschreiten soll!)

Wo die Anforderungen an die Betriebssicherheit nicht so groß sind (z. B. bei kleineren Nebenstellenanlagen), wird die Stromversorgung ausschließlich aus dem öffentlichen Netz entnommen (Netzspeisegeräte). Dabei muß in Kauf genommen werden, daß bei Netzausfall kein Betrieb innerhalb der betreffenden Anlage möglich ist.

3.2. Die Gewinnung des erforderlichen Gleichstroms

Da die öffentlichen Stromversorgungsnetze mit Dreh- bzw. Wechselstrom betrieben werden, muß die für die Stromversorgung von Fernmeldeanlagen benötigte Gleichspannung durch Umspannen in Transformatoren und anschließende Gleichrichtung gewonnen werden. Früher wurden dazu auch Maschinenumformer verwendet. Die Gewinnung der Gleichspannung geschieht heute fast ausschließlich durch Gleichrichtung der transformierten Wechselspannung mit Hilfe von Trockengleichrichtern.

3.2.1. Der Trockengleichrichter

Der Trockengleichrichter ist in letzter Zeit wesentlich verbessert worden. Er übertrifft alle anderen Gleichrichterarten (Röhren-, Quecksilberdampf-, mechanische Gleichrichter, Maschinenumformer) hinsichtlich Lebensdauer, Wirkungsgrad, geringem Raumbedarf und Einfachheit der Bedienung.

In der Stromversorgungs- und Meßtechnik sind heute 3 Trockengleichrichtertypen gebräuchlich:

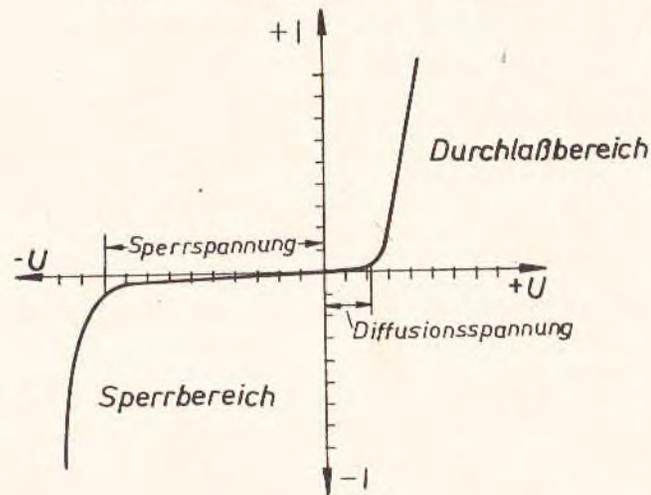
a) Selengleichrichter	}	Stromversorgung
b) Siliziumgleichrichter		
c) Kupferoxydulgleichrichter		Meßtechnik

Die Erklärung für die Wirkungsweise der Trockengleichrichter ist in einer Grenzschicht zwischen einem Halbleiter (Selen, Silizium, Kupferoxydul oder auch Germanium) und einer Gegenelektrode zu suchen.

Trockengleichrichter weisen die Eigenschaft auf, den elektrischen Strom nur in einer Richtung durchzulassen und in der Gegenrichtung fast vollkommen zu sperren. Diese Eigenschaft läßt sich aus einer Gleichrichterkennlinie am einfachsten erkennen:

¹⁾ ESK = Edelmetall-Schnellrelais-Koppelfeld

Kennlinie eines Halbleitergleichrichters



(Abb. 29)

Legen wir an einen Trockengleichrichter in Durchlaßrichtung eine Gleichspannung, die wir von 0 V an langsam erhöhen, so steigt der fließende Strom zunächst kaum merkbar. Von einer bestimmten Spannung an, die je nach Gleichrichtertyp etwa zwischen 0,1 V und 0,6 V liegt, steigt der Strom sehr schnell an. Kehrt man dagegen die Richtung der angelegten Spannung um (negative Spannung), so fließt ein kaum meßbarer Strom. Erst bei verhältnismäßig hoher Spannung in Sperrichtung wird der Gleichrichter ebenfalls stromdurchlässig.

Vier Merkmale sind für die Kennlinie der Trockengleichrichter typisch:

- der Durchlaßbereich** (= der Bereich für die angelegte Spannung $+U$, in dem ein brauchbarer Strom fließt),
- der Sperrbereich** (= der Bereich für die angelegte Spannung $-U$, in dem nur ein sehr geringer – kaum meßbarer – sog. Reststrom fließt),
- die sog. Diffusionsspannung** (Das ist eine dem Gleichrichtertyp eigene Spannung, die zu dem typischen Kennlinienknick im Durchlaßbereich führt. Die Diffusionsspannung wird durch einen Ladungsträgeraustausch [Diffusion] an der Sperrschicht hervorgerufen. Sie wirkt der angelegten Spannung entgegen, so daß im Durchlaßbereich erst ein Strom fließen kann, wenn die angelegte Spannung größer ist als die Diffusionsspannung. Der durch die Diffusionsspannung hervorgerufene Kennlinienknick wird in der Elektro- und Fernmeldetechnik vielfach ausgenutzt. Beispiele

dafür sind der Gehörschutzgleichrichter im Fernsprechapparat und der Gleichrichter als Gegenzelle.),

d) die Sperrspannung (Das ist die Spannung in Sperrichtung, bis zu der über den Gleichrichter kein brauchbarer Strom fließt. Wird die Spannung in Sperrichtung weiter erhöht, so kommt es im Gleichrichter ähnlich wie in einem Kondensator zu einem Durchbruch [Durchschlag] von Ladungsträgern. Die Folge davon ist ein plötzliches Ansteigen des Stromes in Sperrichtung. Der dadurch verursachte Kennlinienknick wird ebenfalls häufig ausgenutzt, um Spannungen zu stabilisieren. Die für diesen Zweck verwendeten Trockengleichrichter werden als Zenerdioden bezeichnet.)

Die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Trockengleichrichtertypen werden in der Übersicht auf Seite 54 zusammengestellt.

Aus den Zahlenangaben der Übersicht ist leicht zu erkennen, daß der Silizium-Gleichrichter die anderen Typen in seinen Eigenschaften bei weitem übertrifft. Ein weiterer Vorteil des Silizium-Gleichrichters ist seine geringe Baugröße: Er hat einen Raumbedarf von weniger als $\frac{1}{10}$ des Raumbedarfs eines Selengleichrichters gleicher Leistung. Somit wird der Silizium-Gleichrichter künftig den Selen-Gleichrichter in Stromversorgungsanlagen verdrängen.

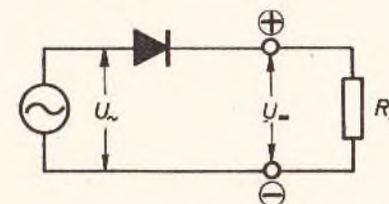
3.2.2. Gleichrichterschaltungen

Es gibt eine ganze Anzahl von Gleichrichterschaltungen, von denen aber nur wenige gebräuchlich sind. Im Rahmen dieses Buches sollen daher nur die beiden wichtigsten Schaltungsarten erläutert werden, wie sie in der Stromversorgungstechnik für Fernmeldeanlagen angewendet werden.

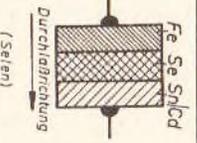
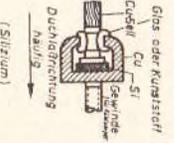
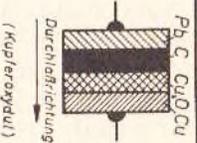
3.2.2.1. Die Einwegschaltung

Schalten wir in einen Wechselstromkreis einen Gleichrichter, so läßt er aufgrund seiner Eigenschaften den Strom nur während der positiven Halbwelle der Sinuskurve durch. Bei entgegengesetzter Stromrichtung – also während der negativen Halbwelle der Sinuskurve – sperrt er.

Einweg-Schaltung



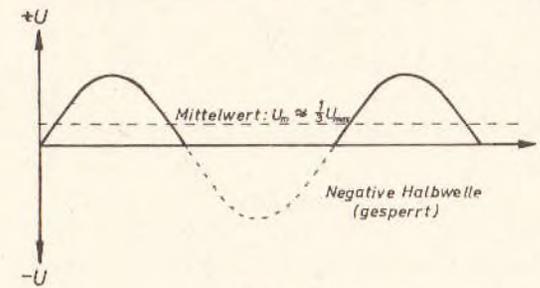
(Abb. 30)

Type	Aufbau	Bestandteile	Sperrspannung U_{off} V	zul. Strombelastung $\frac{A}{cm^2}$	zul. Betriebstemperatur $^{\circ}C$	Diffusionspannung V	Wirkungsgrad %	Anwendung
Selen-Gleichrichter	 Fe, Se, Sn, Cd Durchlaßrichtung (Selen)	Fe = Eisen Se = Selen Sn, Cd = Zinn-Cadmium-Legierung	15-20	0,08	80	0,4	80	Gleichrichter für Netzgeräte (Rundfunk- u. Fernsehgeräte), Ladegeräte, Gleichrichter für Sammlerbatterien, Netzspeisegeräte, Gegenzellen
Silizium-Gleichrichter	 Glas oder Kunststoff Cu, Si Schwefel Si Durchlaßrichtung (Silizium)	Cu = Kupfergehäuse Si = Siliziumtablette (legiert) Cu-Seil = Gegenelektrode	400-800	bis 200	140	0,6	99,6	Künftig Ersatz für den Selen-Gleichrichter. Für alle Anwendungsbereiche der Stromversorgungstechnik.
Kupferoxyd-Gleichrichter	 Pb, C, CuO, Cu Durchlaßrichtung (Kupferoxyd)	Pb = Blei C = Kohlenstoff (Graphit) Cu ₂ O = Kupferoxyd Cu = Kupfer	5-8	0,03	50	0,1	70	Wegen der geringen Diffusionspannung vorzüglich als Meßgleichrichter geeignet. Für Stromversorgungsanlagen jedoch unwirtschaftlich.

Aufbau und Eigenschaften von Trockengleichrichtern

Stellen wir den Spannungs- oder Stromverlauf am Verbraucherwiderstand R_a dar, so ergibt sich folgendes Liniendiagramm:

Spannungsverlauf nach Einweg-Gleichrichtung



(Abb. 31)

Da die negative Halbwellen gesperrt wird, ist der Mittelwert der Gleichspannung verhältnismäßig klein. Die von einem Gleichrichter durch Gleichrichtung einer Wechselspannung gewonnene Gleichspannung wechselt ständig ihre Größe (aber nicht mehr die Richtung!). Man spricht daher von pulsierender Gleichspannung oder auch von pulsierendem Gleichstrom. Da diese Gleichrichterschaltung nur eine Halbwellen des zugeführten Wechselstroms durchläßt, wird sie als

Einweg-Schaltung

bezeichnet.

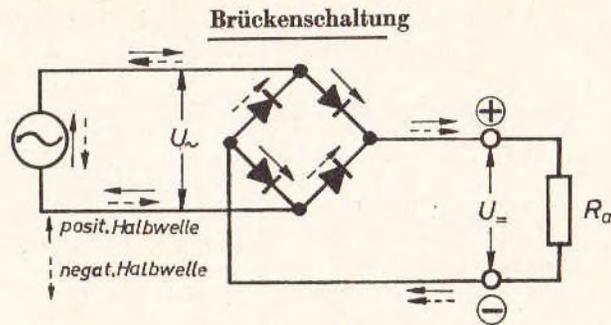
3.2.2.2. Brücken- oder Graetzgleichrichterschaltung

Wir haben beim Einweggleichrichter erkannt, daß nur eine Halbwellen des Wechselstroms als Gleichstrom nutzbar gemacht werden kann.

Diesen Mangel vermeidet man bei der Zweiweg-Gleichrichtung oder bei der Brückenschaltung, nach ihrem Erfinder auch Graetzschaltung genannt. Die Zweiwegschaltung war in Rundfunkgeräten mit Röhrengleichrichtern üblich. Sie erfordert aber einen Transformator mit zwei Sekundärwicklungen. Heute hat sich jedoch der Trockengleichrichter und mit ihm die Brückenschaltung allgemein durchgesetzt.

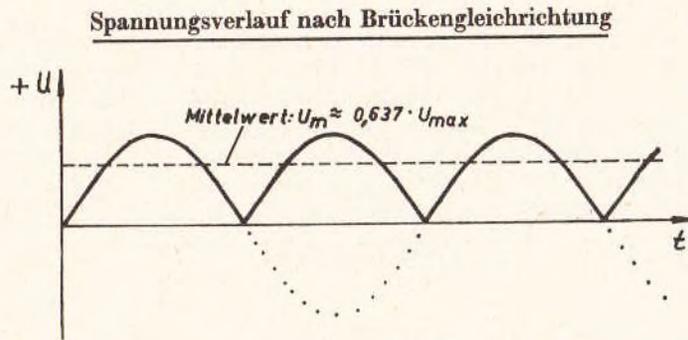
Aufgrund seiner Schaltung nutzt der Brückengleichrichter auch die negative Halbwellen des Wechselstroms aus.

Bei der Brückenschaltung werden sowohl die positive als auch die negative Halbwellen des Wechselstroms nach Gleichrichtung in gleicher Richtung durch den Gleichstromkreis geleitet (siehe Stromrichtungspfeile in Abb. 32).



(Abb. 32)

Somit ergibt sich für den Spannungsverlauf an R_a folgendes Liniendiagramm:



(Abb. 33)

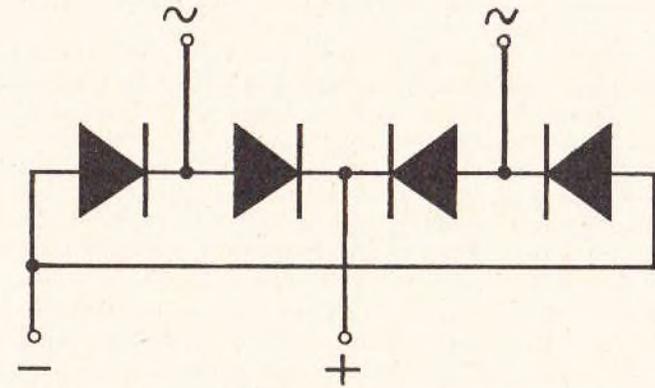
Der Mittelwert der durch Brückengleichrichter gewonnenen Gleichspannung ist wesentlich höher, da der Strom fast ununterbrochen fließt. Aber auch hier haben wir es noch mit pulsierendem Gleichstrom zu tun, wenn auch die Welligkeit gegenüber der Einweggleichrichtung schon stark herabgesetzt ist.

Die Gleichrichterzellen einer Brückenschaltung werden üblicherweise als Gleichrichtersäule auf einer Achse zusammengefaßt. Abb. 34 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Gleichrichtersäule.

3.2.3. Siebung

Die Liniendiagramme des durch Einweg- oder Brückenschaltung gewonnenen Gleichstroms lassen erkennen, daß man den pulsierenden

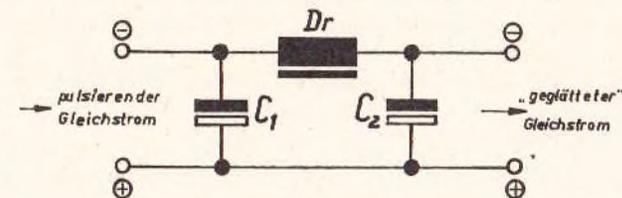
Gleichrichtersäule in Brückenschaltung (schematisch)



(Abb. 34)

Gleichstrom nicht ohne weiteres zur Stromversorgung von Fernmeldeanlagen verwenden kann. Seine Welligkeit ist viel zu hoch. In erster Annäherung kann man die Frequenz der Welligkeit bei Einweggleichrichtung aus 50-Hz-Wechselstrom mit 50 Hz, bei der Brückengleichrichtung aus 50-Hz-Wechselstrom mit 100 Hz annehmen. Der Anker eines Gleichstromrelais würde bei Speisung aus einem Einweggleichrichter sehr stark flattern. Als Mikrofonstrom würde der pulsierende Gleichstrom wegen des starken „Brummens“ eine Sprechverständigung unmöglich machen. Man muß daher den pulsierenden Gleichstrom durch geeignete Maßnahmen in „glatten“ Gleichstrom umwandeln. Das geschieht durch die Siebglieder Kondensator und Drossel. In vereinfachten Schaltungen wird die Drossel auch manchmal durch Wirkwiderstände ersetzt. Die Schaltung einer sog. Siebkette ist in Abb. 35 wiedergegeben.

Schaltung einer Siebkette



(Abb. 35)

Anhand der im Teil I dieses Handbuchs gewonnenen Erkenntnisse wollen wir nun die Wirkungsweise der Siebglieder Kondensator und Drossel erklären:

Der Kondensator liegt parallel zum Verbraucher. Er beeinflusst die Spannung. Die zugeführte Spannung ist pulsierende Gleichspannung. Steigt die Spannung an, so wird der Kondensator aufgeladen – er nimmt Energie auf. Diese gespeicherte Energie gibt er wieder an den Verbraucher ab, wenn die Spannung aus dem Gleichrichter absinkt. Der Siebkondensator wirkt also während der Spannungslücken des Gleichrichters als Spannungsquelle.

Liegt am Ausgang einer Siebkette keine oder eine geringe Belastung, so werden die Kondensatoren nahezu auf den Spitzenwert der aus dem Gleichrichter gelieferten pulsierenden Gleichspannung aufgeladen. Mißt man die Spannung an einer unbelasteten Siebkette, so zeigt der Spannungsmesser nahezu den Spitzenwert der pulsierenden Gleichspannung an.

Die Drossel (Induktivität) liegt in Reihe mit dem Verbraucher. Sie beeinflusst den Strom. Wir haben bei den Induktionsvorgängen bereits festgestellt, daß in einer Induktivität nach dem Lenzschen Gesetz beim Einschalten (Stromanstieg) ein Induktionsstrom entgegengesetzter Richtung, beim Ausschalten (Stromabfall) jedoch ein Induktionsstrom gleicher Richtung wie der zugeführte Strom erzeugt wird. Die Drossel wirkt also beim Stromanstieg stromhemmend, beim Stromabfall dagegen stromerhaltend.

Bei genügender Bemessung der Kapazitäten und Induktivität ist hinter der Siebkette praktisch reine Gleichspannung und reiner Gleichstrom („geglätteter“ oder „glatter“ Gleichstrom) vorhanden. Je höher die Stromaufnahme des Verbrauchers ist, desto größer müssen Kapazität und Induktivität bemessen werden.

Aber nicht nur Kondensatoren und Drosseln bewirken eine Glättung des pulsierenden Gleichstroms. Auch **galvanische Batterien und Akkumulatoren wirken wie ein Siebkondensator**. Die Bleisammlerbatterie einer VStW kann mit einem Kondensator mit einer Kapazität von einigen Tausend oder gar Hunderttausend Mikrofarad verglichen werden. Damit kann für die Siebung des pulsierenden Gleichstroms folgende Richtlinie aufgestellt werden:

Für die direkte Speisung von Fernmeldeanlagen aus einem Netzgleichrichter ist eine ausreichend bemessene Siebkette vorzusehen. Das gilt vor allem für Netzspeisegeräte in NStAnl und neuerdings auch VStW.

Liegt dagegen parallel zum Verbraucher eine galvanische Batterie oder Sammlerbatterie, so übernimmt diese aufgrund ihrer sehr großen vergleichbaren Kapazität die Aufgabe der Siebkette. In diesem Fall sind nur gering bemessene zusätzliche Siebglieder erforderlich.

3.2.4. Die Reihen- und Parallelschaltung von Gleichrichterzellen

3.2.4.1. Reihenschaltung von Gleichrichterzellen

Eine Gleichrichterzelle hat eine ganz bestimmte zulässige Sperrspannung, die nicht überschritten werden darf. Müssen Spannungen gleichgerichtet werden, die höher sind, als die Sperrspannung einer Gleichrichterzelle, so wendet man sinngemäß die Reihenschaltung von Gleichrichterzellen an. Zur Berechnung benutzt man folgende Formel:

$$U_g = n \cdot U_{sp}$$

Darin bedeuten:

U_g = gleichzurichtende Gesamtspannung (Effektivwert),

n = Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen,

U_{sp} = Sperrspannung (Effektivwert) einer Gleichrichterzelle.

Zur Reihenschaltung dürfen nur Zellen gleichen Typs verwendet werden.

Beispiel:

Wie viele Selen-Gleichrichterzellen mit einer Sperrspannung von 20 V müssen zur Gleichrichtung der Netzwechselfspannung von 220 V in Reihe geschaltet werden?

Gegeben: $U_g = 220 \text{ V}$; $U_{sp} = 20 \text{ V}$

Gesucht: n

Lösung: $U_g = n \cdot U_{sp}$

$$n = \frac{U_g}{U_{sp}} = \frac{220 \text{ V}}{20 \text{ V}} = \underline{\underline{11}}$$

Es müssen 11 Selen-Gleichrichterzellen in Reihe geschaltet werden.

3.2.4.2. Parallelschaltung von Gleichrichterzellen

Die Parallelschaltung von Gleichrichterzellen wird angewandt, wenn der Strombedarf größer ist als die zulässige Strombelastbarkeit einer Zelle. Der Widerstand in Durchlaßrichtung (Durchlaßwiderstand) ist jedoch trotz sorgfältiger Auswahl der Gleichrichterzellen von Zelle zu Zelle verschieden. Dadurch kommt es bei der Parallelschaltung zu ungleichmäßi-

ger Stromverzweigung. Um sicherzustellen, daß trotz der Streuungen keine Zelle in der Parallelschaltung von einem zu starken Strom durchflossen wird, berechnet man die Zahl der parallelzuschaltenden Zellen aus folgender Formel:

$$I_g = 0,8 \cdot p \cdot I_D.$$

Darin bedeuten:

- I_g = zulässiger Gesamtstrom der Parallelschaltung,
 p = Anzahl der parallelgeschalteten Zellen,
 I_D = zulässige Strombelastbarkeit einer Zelle.

Auch zur Parallelschaltung dürfen nur Zellen gleichen Typs verwendet werden.

Beispiel:

Wie viele Si-Gleichrichterzellen müssen parallelgeschaltet werden, wenn ein Gesamtstrom von 7,5 A benötigt wird und eine Zelle mit 1,6 A belastet werden darf?

Gegeben: $I_g = 7,5 \text{ A}$; $I_D = 1,6 \text{ A}$

Gesucht: p

Lösung: $I_g = 0,8 \cdot p \cdot I_D$

$$p = \frac{I_g}{0,8 \cdot I_D} = \frac{7,5 \text{ A}}{0,8 \cdot 1,6 \text{ A}} = \underline{\underline{5,86}}$$

Es müssen 6 Si-Gleichrichterzellen parallelgeschaltet werden.

3.2.5. Spannungsregelung

Der Strombedarf einer Fernmeldeanlage schwankt im Verlauf eines Tages sehr stark. Damit verbunden treten zwangsläufig in der Stromversorgungsanlage Spannungsschwankungen auf. Zum sicheren Betrieb von Fernmeldeanlagen ist jedoch die Einhaltung bestimmter Grenzen erforderlich. In Stromversorgungsanlagen kann die Spannung entweder im Netzgerät oder am Verbraucher geregelt werden. Für die Spannungsregelung wurden in Fernmeldeanlagen bisher verschiedene Techniken angewandt. Dazu gehören:

- Spannungsregelung durch Relais (Zu- oder Abschalten von Widerständen),
- Wälzregler (magnetisch gesteuerte Schaltung von Widerständen),
- Kohleldruckregler (Änderung des Widerstandes einer Säule aus Kohlescheiben durch Druckänderung ähnlich wie beim Kohlemikrofon),
- Stufentransformator (Umschaltung auf verschiedene Abgriffe an der Sekundärwicklung eines Transformators).

Heute ist die lastabhängige Zu- oder Abschaltung von Gegenzellen am meisten gebräuchlich. Die bisher vielfach noch verwendeten alkalischen Gegenzellen sind im Band B 3 des „Handbuchs der Fernmeldetechnik“ beschrieben. Sie sind aber durch Trockengleichrichter-Gegenzellen weitgehend abgelöst worden. Die Wirkungsweise des Trockengleichrichters als „Gegenzelle“ beruht auf dem Kennlinienknick im Durchlaßbereich, hervorgerufen durch die Diffusionsspannung. Schaltet man einen Trockengleichrichter – z. B. einen Silizium-Gleichrichter – in Durchlaßrichtung zwischen Gleichstromquelle und Verbraucher, so ist die Spannung am Verbraucher um den Betrag der Diffusionsspannung geringer. Die Diffusionsspannung wirkt ja, wie wir bereits festgestellt haben, der angelegten Spannung entgegen. Je nach Höhe der erforderlichen Spannungsänderung werden eine oder mehrere Gegenzellen durch Schalter in den Verbraucherstromkreis geschaltet. Da die Trockengleichrichter auch im Durchlaßbereich einen – wenn auch kleinen – inneren Widerstand besitzen, ist der wirksame Spannungsverlust geringfügig stromabhängig. Er schwankt etwa bei Selen-Gegenzellen zwischen 0,4 und 0,7 V, bei Silizium-Gegenzellen zwischen 0,6 und 0,8 V je nach Strombelastung.

3.2.6. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.2.

1. Welche Arten von Trockengleichrichtern werden in der Stromversorgungs- und Meßtechnik verwendet?
2. Skizzieren Sie die Kennlinie eines Trockengleichrichters und geben Sie die vier wichtigsten Merkmale an!
3. Erläutern Sie den Begriff Diffusionsspannung!
4. Für welche Zwecke wird der durch die Diffusionsspannung verursachte Kennlinienknicke ausgenutzt?
5. Warum verwendet man in der Meßtechnik vorwiegend Kupferoxydulgleichrichter, obgleich er hinsichtlich Sperrspannung, Strombelastbarkeit, Wirkungsgrad und Temperaturempfindlichkeit den anderen Trockengleichrichtertypen weit unterlegen ist?
6. Skizzieren Sie eine Einweg-Gleichrichterschaltung und das zugehörige Liniendiagramm für die gewonnene Gleichspannung!
7. Wie groß ist etwa der Mittelwert der durch Einweg-Gleichrichtung gewonnenen Spannung?
8. Skizzieren Sie eine Brücken-Gleichrichter-Schaltung und geben Sie durch Stromrichtungspfeile den Stromverlauf bei positiver und negativer Halbwelle des zugeführten Wechselstromes an!
9. Warum ist zur Stromversorgung von Fernmeldeanlagen hinter dem Netzgleichrichter eine Siebkette vorzusehen?
10. Wie ist eine Siebkette geschaltet?
11. Welche Aufgabe erfüllen Kondensator und Drossel in einer Siebkette?
12. Versuchen Sie zu erklären, wieso eine parallelgeschaltete Batterie wie ein Siebkondensator wirkt!
13. Erläutern Sie die Wirkungsweise des Trockengleichrichters als Gegenzelle!
14. Wie muß ein Trockengleichrichter als Gegenzelle in einen Gleichstromkreis geschaltet werden?
15. Wie hoch sind etwa die Gegenspannungen einer Selen- und einer Siliziumgegenzelle?

3.3. Die Betriebsarten der Stromversorgungseinrichtungen für Fernmeldeanlagen

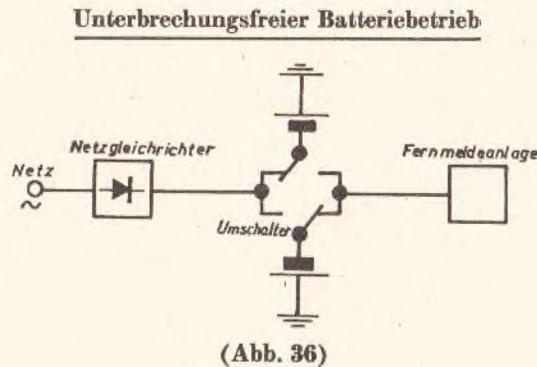
Für die Versorgung von Fernmeldeanlagen mit Gleichstrom sind hauptsächlich drei Betriebsarten üblich, bei denen die Energie dem öffent-

lichen Stromversorgungsnetz entnommen wird. Für evtl. Netzausfälle stehen Sammlerbatterien und Netzersatzanlagen zur Verfügung. Die Netzersatzanlagen werden im Abschnitt 3.4. behandelt.

3.3.1. Reiner Batteriebetrieb (Lade- und Entladebetrieb)

Die Fernmeldeanlage wird allein aus einer Sammlerbatterie versorgt, d. h. der Verbraucherstrom wird ausschließlich aus einer geladenen Sammlerbatterie entnommen. Ist die Batterie entladen, so wird sie von der Fernmeldeanlage abgeschaltet und mittels Gleichrichter oder Umformer aus dem Wechselstromnetz wieder aufgeladen. Die Fernmeldeanlage ist während der Batterieaufladung spannungslos, d. h. nicht betriebsfähig.

Darf der Betrieb der Fernmeldeanlage aus bestimmten Gründen nicht unterbrochen werden, so werden zwei Batterien eingesetzt. Eine von diesen hält die Anlage in Betrieb, während die zweite in der Zwischenzeit



über Gleichrichter geladen wird. Die Umschaltung von der entladenen Batterie auf die geladene läßt sich ohne Unterbrechung des Betriebs durchführen.

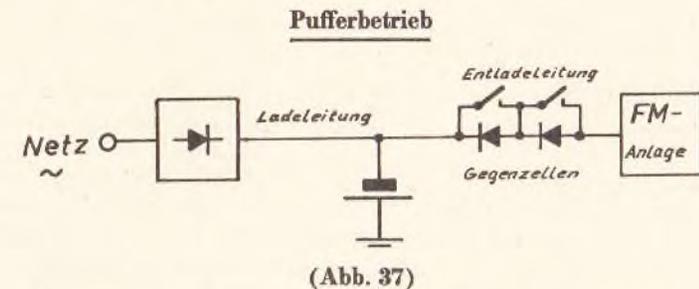
Der reine Batteriebetrieb hat den Vorteil, daß bei ihm nur die Batterie zur Stromversorgung dient. Siebketten sind nicht erforderlich, da Batterien ja reinen Gleichstrom liefern. Für unterbrechungsfreien Betrieb werden jedoch zwei Batterien benötigt (teuer). Der einfache Batteriebetrieb wird nur noch für tragbare Geräte – meistens Meßgeräte – der Fernmelde-technik angewendet (Kabelmeßgeräte, Funkmeßgeräte, Funkkontroll-empfänger).

3.3.2. Pufferbetrieb

Bei dieser Betriebsart sind Gleichrichter, Batterie und Fernmeldeanlage ständig parallelgeschaltet. Fällt der Gleichrichter durch Unterbrechung

der Netzstromversorgung aus, so läuft der Betrieb der Fernmeldeanlage unterbrechungslos weiter. Die Speisung übernimmt jetzt die Batterie.

Beim Pufferbetrieb wird der mittlere Strombedarf der Fernmeldeanlage aus dem Netz-Gleichrichter entnommen. Tritt in der Anlage stärkerer Betrieb auf, so wird der jetzt zusätzlich benötigte Strom von der Batterie geliefert. Bei niedrigerem Stromverbrauch lädt der Netz-Gleichrichter die Batterie wieder mit auf. Die Batterie wirkt also als Puffer zwischen Gleichrichter und Fernmeldeanlage, deshalb nennt man diese Betriebsart „Pufferbetrieb“ und den Gleichrichter „Pufferladegleichrichter“. Die Batterie wirkt bei der Stromversorgung aus dem Netz-Gleichrichter gleichzeitig noch als großer Kondensator von mehreren tausend μF . Dieser stellt einen Kurzschluß für die noch vorhandenen Oberwellen des pulsierenden Gleichstroms dar (Siebkondensator). Die Batterieladespannung des Gleichrichters muß immer größer sein als die höchste Batteriespannung (z. B. bei einer 60-Volt-Batterie [30 Zellen], also für die Amtsbatterie, die nur bis zum Gasungspunkt geladen wird, beträgt sie ungefähr 2,4 mal 30; das sind 72 Volt). Da diese Spannung aber zu hoch für die Fernmeldeanlage ist, werden in die Entladeleitung nach Bedarf Gegenzellen geschaltet. Beim Pufferbetrieb müssen Lade- und Entladeleitung getrennt geführt werden.



Da die Belastung der Stromversorgungsanlage vor allem bei Wählanlagen sehr stark verkehrsabhängig schwankt, die Batterie aber während der Hauptverkehrszeit den Spitzenstrom liefern muß, steht sie nicht mehr voll geladen zur Verfügung, wenn am Ende oder kurz nach der Hauptverkehrszeit das Netz ausfällt. Aus diesem Grunde muß die Kapazität von Pufferbatterien etwas großzügiger bemessen werden.

Infolge der ständigen Beanspruchung der Batterie – Entladung bei Spitzenstrombedarf und Aufladung bei geringer Belastung – tritt eine allmähliche Sulfatierung der Bleiplatten ein. Zur Erhaltung der Batterie ist von Zeit zu Zeit (ca. nach 1 Woche) eine volle Aufladung erforderlich. Daher muß eine zweite Batterie vorhanden sein, die während der Nachladung der ersten die Stromversorgung übernimmt.

Die Lebensdauer der Bleisammler-Batterie ist beim Pufferbetrieb nicht besonders groß. Als Folge der stark wechselnden Belastung, der Sulfatierung und Wiederaufladung tritt ein verhältnismäßig starker Verlust an der wirksamen Plattenmasse auf.

3.3.3. Bereitschaftsbetrieb

Die Sammlerbatterien haben in der Stromversorgung die Hauptaufgabe, den unterbrechungsfreien Betrieb – z. B. bei Netzausfall – sicherzustellen. Sie bedingen einen hohen Kostenaufwand für Beschaffung, Batterieraum und Wartung. Es liegt deshalb nahe, die Batterien nur dann einzusetzen, wenn die Netzstromversorgung ausfällt, im übrigen aber die Batterie so zu warten, daß eine größtmögliche Lebensdauer erreicht wird.

Eine Bleisammler-Batterie zeigt im vollgeladenen Zustand eine Selbstentladung, die auf das Sulfatieren der Platten zurückzuführen ist. (Werden Bleielektroden in verdünnte Schwefelsäure getaucht, so bildet sich nach und nach Bleisulfat.) Um diese Selbstentladung zu verhindern, ist eine ständige Ladung mit einer Spannung von 2,23 V je Zelle erforderlich. Diese Spannung wird als Erhaltungsladespannung bezeichnet. Eine voll geladene Batterie, die an Erhaltungsladespannung liegt, hat die größte Lebensdauer.

Die wichtigsten kennzeichnenden Spannungswerte für eine Bleisammlerzelle sollen hier noch einmal zusammengestellt werden:

Nennspannung = 2,0 V / Zelle

Ruhe-spannung = Sie ergibt sich nach der Faustformel

$$E = \gamma + 0,84$$

(γ = Säuredichte)

und beträgt daher für stationäre Bleisammler

$$E = 1,2 + 0,84 = 2,04 \text{ V / Zelle}$$

Erhaltungsladespannung = 2,23 V / Zelle

Wiederaufladespannung

(bis zum Gasungspunkt) = 2,4 V / Zelle

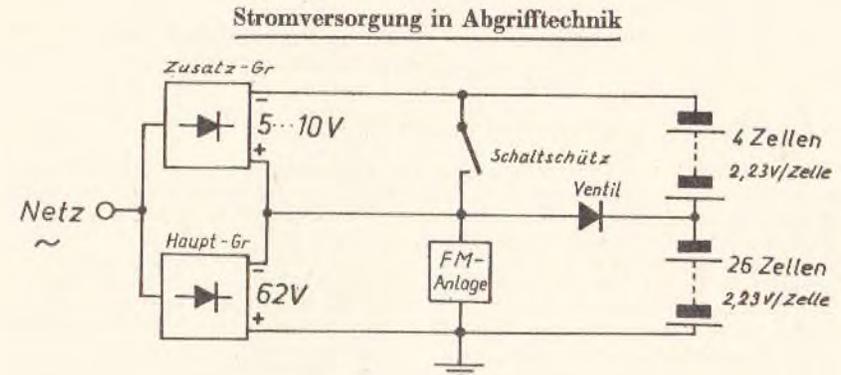
Entladeschlusspannung = 1,8 V / Zelle.

Kennzeichen des Bereitschaftsbetriebs sind:

- Das Netzgleichrichtergerät übernimmt vollständig die Stromversorgung der Fernmeldeanlage (auch Spitzenstrom!).
- Die Batterie wird ständig voll geladen in Bereitschaft gehalten. Sie liegt an Erhaltungsladespannung (2,23 V/Zelle).

- Erst bei Netzausfall wird die Stromversorgung durch die voll geladene Batterie übernommen. Sie wird durch Ventilzellen (Gleichrichterzellen) und Zusatzschalter unterbrechungsfrei auf die Fernmeldeanlage umgeschaltet.

Wir wollen eine Schaltungsart des Bereitschaftsbetriebes, die sog. **Abgrifftechnik**, anhand eines Blockschaltbildes näher untersuchen:



(Abb. 38)

Das Netzgleichrichtergerät (Hauptgleichrichter) versorgt direkt die Fernmeldeanlage – bei Wählanlagen z. B. mit 62 V Spannung. Über eine Ventilzelle werden gleichzeitig 26 der insgesamt 30 Batteriezellen mit Erhaltungsladespannung versorgt. Da die Erhaltungsladespannung für die gesamte Batterie $30 \cdot 2,23 \text{ V} = 67 \text{ V}$ beträgt, die Fernmeldeanlage selbst aber nur 60 V Nennspannung benötigt, müssen die restlichen 4 Batteriezellen durch einen Zusatzgleichrichter mit der Erhaltungsladespannung versorgt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß an der Ventilzelle ebenfalls ein Spannungsabfall auftritt.

Fällt die Netzstromversorgung aus, so werden die 26 Zellen der Batterie durch die Ventilzelle kontaktlos auf die Fernmeldeanlage geschaltet (die Ventilzelle liegt für die Entladung der Batterie in Durchlaßrichtung). Dadurch kommt es zu einer vorübergehenden Verminderung der Betriebsspannung auf ca. 54 V. Durch einen Schaltschütz werden unmittelbar darauf die restlichen 4 Zellen ebenfalls an die Fernmeldeanlage geschaltet, so daß damit wieder die volle Betriebsspannung zur Verfügung steht. Diese Betriebsart erfordert einen höheren Aufwand für das Netzspeisegerät, das ja für die Spitzenlast bemessen werden muß. Auch die Siebketten müssen größer bemessen sein. Dieser Aufwand wird jedoch durch die größere Lebensdauer der Batterie aufgewogen. Da die Batterie für einen etwaigen Netzausfall immer voll geladen bereitsteht, braucht ihre Kapa-

zität nicht so hoch wie beispielsweise beim Pufferbetrieb gewählt zu werden.

Für die Bemessung der **Energiereserven bei Netzausfall** gelten heute im Bereich der Bundespost folgende Richtlinien:

Ortsvermittlungsstellen = **6stündige Batteriereserve,**

Fernvermittlungsstellen
(KVSt, HVSt, ZVSt)
und Verstärkerstellen = **4stündige Batteriereserve und**
ortsfeste Netzersatzanlage.

3.3.4. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 3.3.

1. Welche Aufgabe erfüllen die Bleisammler-Batterien in der Fernmelde-Stromversorgung? 2. Skizzieren Sie das Blockschaltbild für reinen Batteriebetrieb mit zwei Batterien (unterbrechungsfrei)! 3. Skizzieren Sie das Blockschaltbild für den Pufferbetrieb! 4. Welche Merkmale sind kennzeichnend für den Pufferbetrieb? 5. Aus welchen Gründen wird der Pufferbetrieb heute praktisch kaum noch angewendet? 6. Welche wirtschaftlichen Überlegungen führten zur Entwicklung des Bereitschaftsbetriebes? 7. Erläutern Sie kurz die kennzeichnenden Spannungswerte einer Bleisammlerzelle: Nennspannung, Ruhespannung, Erhaltungsladespannung, Wiederaufladespannung und Entladeschlusspannung! 8. Nach welcher Faustformel kann man die Zellenruhespannung beim Bleisammler bestimmen? 9. Welches sind die wichtigsten Kennzeichen des Bereitschaftsbetriebes? 10. Skizzieren Sie das Blockschaltbild für die Abgrifftechnik! 11. Wie sind heute die Energiereserven für einen etwaigen Netzausfall bei den Stromversorgungsanlagen der Bundespost zu bemessen?

3.4. Netzersatzanlagen

Wie aus den Bemessungsrichtlinien für die Batteriereserven ersichtlich, reicht die Batteriekapazität nicht mehr aus, wenn in Katastrophenfällen mit mehr als 4- bis 6stündigem Ausfall der Netzstromversorgung gerechnet werden muß. Für diese Fälle stehen ortsfeste oder fahrbare Netzersatzanlagen zur Verfügung. Diese Netzersatzanlagen erzeugen je nach der üblichen Netzversorgung Wechsel- oder Drehstrom und werden durch Benzin- oder Dieselmotoren angetrieben. Sie sind also ein vollwertiger Ersatz für die Netzversorgung und ermöglichen neben der eigentlichen Stromversorgung für die Fernmeldeanlagen auch den Betrieb anderer wichtiger Geräte, die zur Betriebsabwicklung notwendig sind (Beleuchtung, Lötkolben usw.).

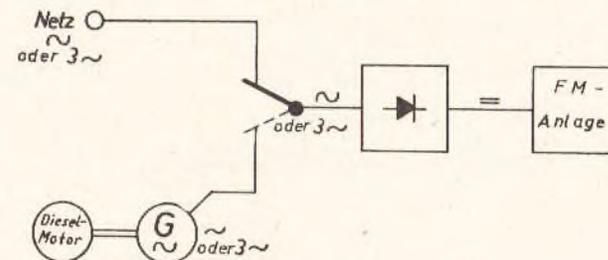
3.4.1. Ortsfeste Netzersatzanlagen (NEA)

Sie sind bei größeren Fernmeldeanlagen vorzusehen und bestehen aus Dieselmotor und Generator. Bei Netzausfall übernehmen zunächst die Batterien die Stromversorgung der Fernmeldeanlagen. Die Netzersatz-

anlage wird dann meistens automatisch, seltener von Hand, durch Preßluft angelassen und übernimmt die gesamte Stromversorgung.

Bei Netzwiederkehr schaltet sich das Diesellaggregat selbsttätig wieder ab.

Ortsfeste Netzersatzanlage



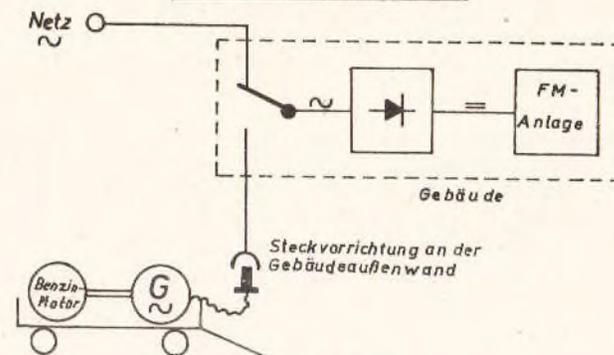
(Abb. 39)

3.4.2. Fahrbare Netzersatzanlagen

Für Fernmeldeanlagen, bei denen keine ortsfesten Netzersatzanlagen installiert sind, stehen fahrbare Netzersatzanlagen bereit. Sie werden bei Bedarf zur Betriebsstelle gebracht. Aus diesem Grunde wird die Batteriereserve bei diesen Betriebsstellen größer bemessen (6 Std.).

Der Antrieb solcher fahrbarer Netzersatzanlagen besteht meistens aus einem Benzinmotor, da Benzinmotoren wegen ihrer geringeren Verdichtung leichter anzulassen sind als Dieselmotoren.

Fahrbare Netzersatzanlage



(Abb. 40)

Da bei kleineren Fernmeldeanlagen keine besonderen Räume für Netzersatzanlagen vorhanden sind, müssen an der Gebäudeaußenwand an leicht zugänglicher Stelle Anschlußvorrichtungen (Steckvorrichtungen) zur Anschaltung der Netzersatzanlage installiert sein.

4. Schutzmaßnahmen gegen Berührungsspannungen

Für den Menschen sind Berührungsspannungen über 65 V gefährlich. Man spricht von einer Berührungsspannung, wenn leitende Geräte- oder Anlagenteile, die nicht zum Betriebsstromkreis gehören, durch irgendwelche Schäden eine Spannung gegen Erde annehmen. Um Unfälle durch elektrischen Strom zu vermeiden, werden nach den VDE-Bestimmungen 0100 u. a. folgende Schutzmaßnahmen angewandt:

- a) Isolierung bzw. Schutzisolierung,
- b) Kleinspannung,
- c) Schutztrennung,
- d) Nullung,
- e) Schutzerdung und
- f) Schutzschaltung.

In Anlagen mit Spannungen bis höchstens 65 V sind Schutzmaßnahmen nicht erforderlich.

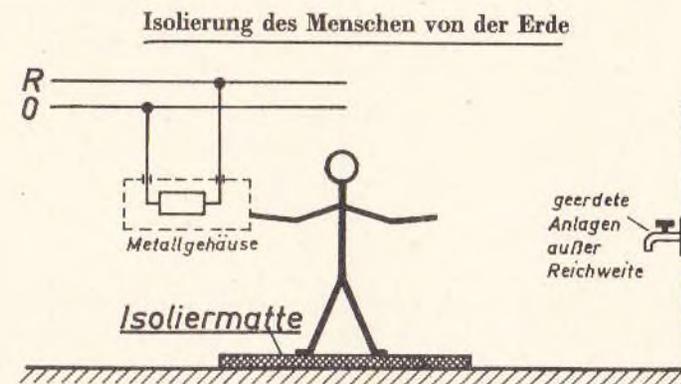
4.1. Isolierung

4.1.1. Betriebsisolierung

Unter Betriebsisolierung versteht man im allgemeinen die fabrikmäßig hergestellte Isolierung der zum Betriebsstromkreis gehörenden Anlagenteile. Dazu gehören z. B. die Isolierumhüllung der Leitungen, Schalter, Stecker sowie die der Isolierung dienenden Schutzkappen für Geräteteile wie z. B. Verteilerdosen usw. Für die Betriebsisolierung gelten besondere VDE-Vorschriften. Zum Beispiel gilt eine Schellackisolierung nicht als ausreichende Betriebsisolierung für Geräte, die an 220-V-Netzspannung betrieben werden.

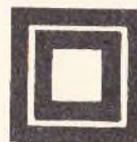
4.1.2. Isolierung des Menschen von der Erde

Bei Arbeiten mit elektrischen Geräten in feuchten Räumen bzw. in oder auf der Erde reicht die Betriebsisolierung nicht als Schutzmaßnahme aus. Selbst bei Verwendung von schutzisolierten Geräten (z. B. Handbohrmaschinen) ist die Gefahr, mit einer hohen Spannung in Berührung zu kommen, verhältnismäßig groß. Zum Beispiel kann bei der Herstellung von Mauerdurchbrüchen eine Starkstromleitung getroffen werden. Darum ist hier eine zusätzliche Isolierung erforderlich. Sie kann durch Gummimatten, gut isolierende Gummistiefel und Gummihandschuhe erreicht werden.



4.1.3. Schutzisolierung

Sie stellt eine zusätzliche Isolierung zur Betriebsisolierung dar. Die Schutzisolierung soll verhindern, daß beim Versagen der Betriebsisolierung leitfähige Geräteteile – die nicht zum Betriebsstromkreis gehören – Berührungsspannungen annehmen können. Schutzisolierte Geräte, wie z. B. elektrische Handbohrmaschinen und LötKolben werden auf den Typenschildern durch folgendes Symbol gekennzeichnet:

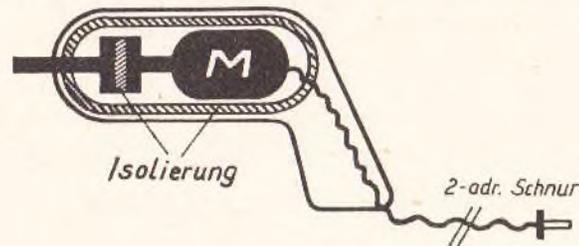


(Abb. 42) Schutzisolierte Geräte haben nur eine zweiadrige Anschlußschnur ohne Schutzleiter. Sie dürfen keine Anschlußklemme für einen Schutzleiter haben. In den meisten Fällen sind die Anschlußschnüre mit einem Schuko-stecker oder einem Profilstecker versehen, der in Schuko-Steckdosen paßt. Die Abb. 43 stellt schematisch eine schutzisolierte Handbohrmaschine dar.

Ein Versagen der Schutzisolierung führt im allgemeinen nicht zu einer Betriebsstörung. Daher kann der einwandfreie Zustand der Schutzisolie-

nung nur durch regelmäßige Kontrollen überprüft und sichergestellt werden.

Schutzisolierte Handbohrmaschine (schematisch)



(Abb. 43)

4.2. Kleinspannung

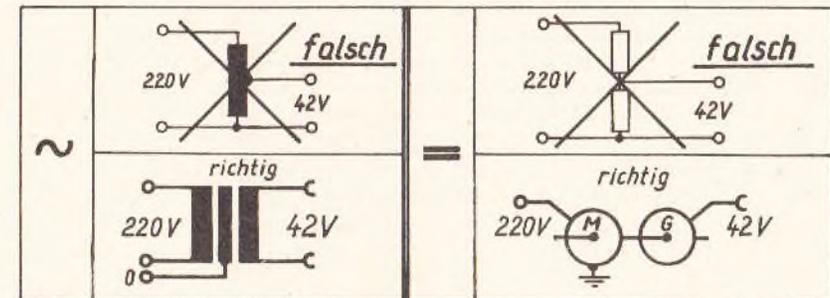
Wechselspannungen bis zu 42 V gelten nach den VDE-Bestimmungen als Kleinspannungen. Sie gelten als ungefährlich, da bei den vorhandenen Übergangswiderständen (z. B. Widerstand des menschlichen Körpers) nur geringe Ströme fließen. (Ströme über 20 mA können tödlich wirken, wenn sie über das menschliche Herz fließen.) Da die Wechselspannung für sinusförmigen Verlauf als Effektivwert angegeben wird, beträgt bei einem Effektivwert von 42 V der Maximalwert 59,4 V. Dieser Wert liegt noch gerade unter der gefährlichen Spannung von 65 V.

Die Schutzmaßnahme Kleinspannung wird vor allem für Geräte oder Anlagen angewandt, bei denen eine zufällige Berührung mit spannungsführenden Anlagenteilen möglich ist (Betriebsarbeiten in Fernmeldeanlagen, Flugzeugbau, Kesselbau, elektrische Spielzeuge). Derartige Spannungen werden in Wechselstromanlagen durch besondere Kleinspannungstransformatoren erzeugt. Ober- und Unterspannungswicklungen dieser Transformatoren müssen sorgfältig isoliert sein. Zudem muß ein Anschluß für den Schutzleiter vorhanden sein (siehe unter Nullung). Da Spartransformatoren keine galvanische Trennung von Primär- und Sekundärstromkreis bewirken, ist ihre Verwendung zur Erzeugung von Kleinspannungen nicht zulässig (siehe Abb. 44).

In Gleichstromanlagen können Kleinspannungen durch Maschinenumformer oder galvanische Batterien erzeugt werden. Dagegen ist die Anwendung einer Potentiometerschaltung zur Erzeugung von Kleinspannungen nicht zulässig, da damit keine galvanische Trennung gegeben ist.

Da in Wählvermittlungen mit höchstens ca. 62 V Gleichspannung gearbeitet wird, sind hier keine besonderen Schutzmaßnahmen erforderlich. Zu beachten ist jedoch, daß innerhalb der Stromversorgungsanlagen für 60 V Nennspannung durchaus höhere Spannungen als 65 V auftreten können (z. B. Wiederaufladespannung = $30 \cdot 2,4 \text{ V} = 72 \text{ V!}$).

Die Erzeugung von Kleinspannungen



(Abb. 44)

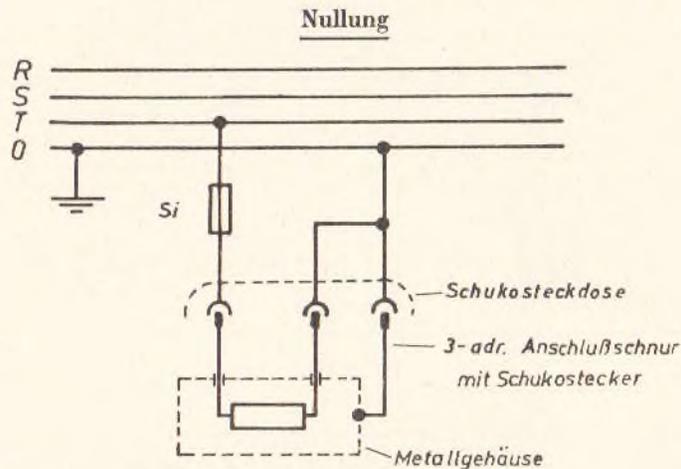
Kleinspannungserzeuger müssen besondere Steckvorrichtungen für die Kleinspannung enthalten. Ebenso müssen die Anschlußstecker für Kleinspannungsgeräte so konstruiert sein, daß sie nicht in 220-V-Netzsteckdosen passen. Kleinspannungsstromkreise dürfen nicht geerdet werden.

4.3. Schutztrennung

Bei den öffentlichen Stromversorgungsnetzen handelt es sich durchweg um sog. sternpunktgeerdete Drehstromnetze. Jeder der drei Drehstromleiter führt gegen Erde eine Spannung (z. B. 220 V). Es ist daher schon gefährlich, mit nur einem Leiter in Berührung zu kommen, wenn man auf gut leitendem Boden steht. Um eine gefährlich hohe Spannung gegen Erde zu vermeiden, wendet man häufig die sog. Schutztrennung mit Hilfe besonderer Trenntransformatoren an. Die Trenntransformatoren stellen eine einwandfreie galvanische Trennung vom geerdeten Netz her. Ihr Übersetzungsverhältnis kann 1:1 betragen. Da der Ausgang (Sekundärseite) erdfrei ist, führt die Berührung eines der beiden Leiter noch nicht zu einer gefährlichen Spannung gegen Erde. Natürlich darf der Sekundärstromkreis nirgends geerdet werden. An einen Schutztrenntransformator darf nur ein Verbraucher angeschlossen werden.

4.4. Nullung

Sie wird heute als häufigste Schutzmaßnahme in sternpunktgeerdeten Drehstromnetzen angewendet. Wie die Bezeichnung schon sagt, ist in diesen Netzen der Sternpunkt, also der Mittelpunkts- oder Nulleiter



geerdet. Die sogenannte Nullung wird dadurch hergestellt, daß man leitende Geräteteile – soweit sie nicht zum Betriebsstromkreis gehören – mit dem geerdeten Mittelpunktsleiter (Nulleiter) verbindet. Der Nulleiter muß besonders sorgfältig verlegt sein und völlig einwandfreie Verbindungen enthalten. Er darf nicht abgesichert sein!

Heute wird von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) im allgemeinen zur Nullung die Installation eines besonderen Schutzleiters vorgeschrieben (dreiadrige Führung). Damit wird erreicht, daß dieser Schutzleiter nicht – wie bisher – den Betriebsstrom des Verbrauchers führt (Spannungsabfall am Leitungswiderstand!) und somit ausschließlich zum Schutz dient.

Da die Anschlußstecker der Geräte symmetrisch aufgebaut sind, müssen zur Nullung 3adrigte Anschlußschnüre verwendet werden. Der Schutzleiter endet an einem besonderen Schutzkontakt (Schuko). Durch Nullung wird erreicht, daß ein Versagen der Betriebsisolierung zum Kurzschluß und damit zum Auslösen der Sicherung führt. Nach der Anpassung der Kennzeichnungsnorm an die internationale Norm der CEE¹⁾ bestehen

¹⁾ CEE = Internationale Kommission für Regeln zur Begutachtung elektrotechnischer Erzeugnisse.

nebeneinander folgende Farbkennzeichnungsnormen für Installationsnetze und Anschlußkabel:

	Ältere VDE-Norm (nicht für Neuanlagen!)	Neue VDE-Norm
spannungsführender Leiter:	schwarz	schwarz
Nulleiter:	grau	blau
Schutzleiter:	rot	gelb-grün

Die Unterbrechung des Schutzleiters in der Anschlußschnur oder Installation führt meistens nicht zu einer Betriebsstörung. Zur Sicherstellung eines einwandfreien Schutzes ist auch bei genullten Geräten und Installationen eine regelmäßige Überprüfung des Schutzleiters erforderlich.

Reine Schutzerdung mit Hilfe eines besonderen Erders ohne Verbindung mit dem Nulleiter ist in sternpunktgeerdeten Netzen unzulässig.

4.5. Schutzerdung

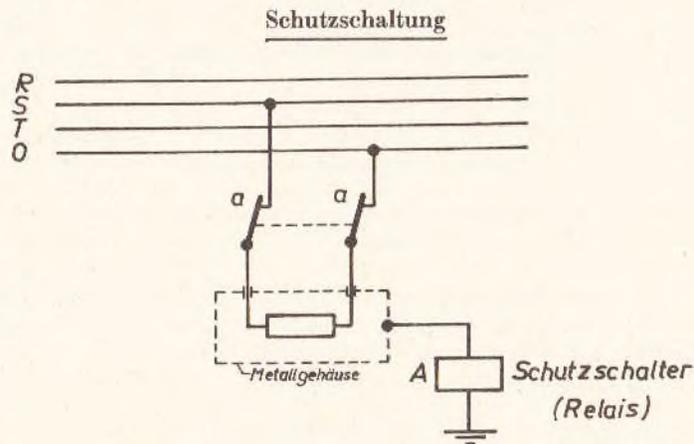
Unter Schutzerdung versteht man die Verbindung von leitenden Geräteteilen, die nicht zum Betriebsstromkreis gehören, mit einem besonderen, bei der Betriebsstelle hergestellten Erder. Die Schutzerdung wird vor allem dort angewandt, wo kein geerdeter Nulleiter vorhanden ist. Schutzerder müssen einen geringen Übergangswiderstand gegen Erde besitzen. Zur Sicherstellung eines Schutzes gegen Berührungsspannungen ist eine regelmäßige Überprüfung der Erder erforderlich. In genullten Netzen muß der Schutzerder mit dem Nulleiter verbunden werden!

Der Schutzerdungswiderstand R_s darf nicht größer sein als $R_s = \frac{65 \text{ V}}{I_a}$, wobei I_a der Abschaltstrom (nicht Nennstrom!) der vorgeschalteten Sicherung in A ist. Der Abschaltstrom einer Sicherung kann das 2,5...5fache des Nennstroms betragen (z. B. bei einer trägen 10A-Sicherung bis zu 50 A).

4.6. Schutzschaltung

Ein Versagen der Betriebsisolierung führt in genullten Geräten meistens zu Schäden an Geräten (z. B. Verschmoren). Hochwertige Geräte werden daher durch eine besondere Schutzschaltung vor einer Zerstörung und dem Auftreten unzulässiger Berührungsspannungen geschützt. Zwischen

leitendem Gehäuse und Erde liegt ein sehr empfindlicher Magnetschalter (Relais).



(Abb. 46)

Tritt zwischen dem Gehäuse und der Erde eine Spannung auf (z. B. durch Versagen der Betriebsisolierung), so löst der fließende Ableitstrom den Schalter sehr schnell aus. Der Schalter trennt den Stromkreis zum Gerät allpolig auf.

Man unterscheidet die sog. **Fehlervoltage- (FU)- Schutzschaltung**, bei der der Schutzschalter beim Erreichen einer bestimmten Berührungsspannung anspricht und die **Fehlerstrom- (FI-) Schutzschaltung**, bei der das Schutzrelais beim Erreichen einer bestimmten Stromstärke des Ableitstroms Gehäuse-Erde den Betriebsstromkreis allpolig abschaltet.

4.7. Schutzmaßnahmen für Fernmeldeeinrichtungen

Die wichtigsten Schutzmaßnahmen für Fernmeldeeinrichtungen sind:

- a) In Fernmeldebetriebsräumen dürfen nur Starkstrom-Steckdosen mit Schutzkontakt vorhanden sein,
- b) Leuchten – auch Deckenleuchten – müssen genullt sein,
- c) el. Arbeitsgeräte, wie LötKolben, müssen schutzisoliert sein,
- d) alle Erder einer Fernmeldebetriebsstelle (z. B. VStW) werden an eine gemeinsame Erdungssammelschiene geführt. Mit der Erdungssammelschiene sind zu verbinden:

der Pluspol der Stromversorgung,
der Nulleiter des Starkstromnetzes,
der Blitzschutz-Ringerder,
die Kabelmäntel aller eingeführter Kabel,
sämtliche Gestelle,
die Wasserleitung,
ggf. die Warmwasserheizung und
das Moniereisen des Gebäudes.

4.8. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 4.1. bis 4.7.

1. Von welcher Höhe an sind elektrische Spannungen für Menschen gefährlich?
2. Was versteht man unter einer Berührungsspannung?
3. Wie sind schutzisolierte Geräte aufgebaut und woran erkennt man, daß es sich um ein schutzisoliertes Gerät handelt?
4. Warum müssen trotz Schutzisolierung einer Bohrmaschine, z. B. im Fernmeldebauendienst, zusätzliche Schutzmaßnahmen, wie Unterlegen einer Gummimatte, Tragen von besonderen Gummistiefeln und Gummihandschuhen angewendet werden?
5. Was ist im Sinne der VDE-Bestimmungen unter Kleinspannung zu verstehen?
6. Welche Maßnahmen dienen der Erzeugung von Kleinspannungen bei Gleich- bzw. bei Wechselstromnetzen?
7. Welchen Schutz gegen Berührungsspannungen bietet ein Trennstromnetz?
8. Was versteht man unter Nullung?
9. Wie ist der Schutzleiter in Anschlußleitungen gekennzeichnet?
10. Aus welchen Gründen ist eine regelmäßige Überprüfung bei der Schutzisolierung oder Nullung von Geräten unerlässlich?
11. Was versteht man unter der Schutzschaltung?
12. Nennen Sie die wichtigsten Bestimmungen zum Schutz gegen Berührungsspannungen in Fernmeldebetriebsräumen!

5. Elektroakustik

Unter Akustik versteht man die Lehre vom Schall. Die Elektroakustik bezieht sich ausschließlich auf die Schallaufzeichnung, -übertragung und wiedergabe mit Hilfe elektronischer Mittel.

5.1. Das Wesen des Schalls

Ein Schall entsteht durch mehr oder weniger schnelle Schwingungen eines elastischen Körpers (Stimmgabel, Stimmbänder, Membran eines Fernhörers oder Lautsprechers, Luftsäule in einer Pfeife). Die Entstehung und auch die Ausbreitung des Schalls setzt wegen seiner Natur als mechanische Schwingung das Vorhandensein von Materie, also festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen voraus. Im luftleeren Raum wird kein Schall übertragen.

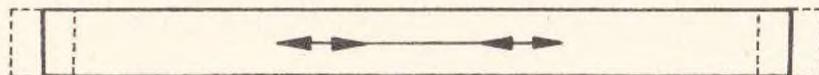
Mit Schall bezeichnet man im allgemeinen mechanische Schwingungen, die vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden. Es ist jedoch üblich geworden, auch mechanische Schwingungen zum Schall (also zur Akustik) zu rechnen, die außerhalb des Hörbereichs des menschlichen Ohres liegen. In der Akustik unterscheidet man daher zwischen

Infraschall;	mech. Schwingungen unterhalb des Hörbereichs: 0 16 Hz (Bodenerschütterungen durch Fahrzeuge oder Erdbeben). Infraschall wird in der Technik z. B. zur Untersuchung der statischen Festigkeit von Bauwerken (Modellen) angewendet.
Hörschall;	mech. Schwingungen, die vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden können: 16 20 000 Hz. Dieser Bereich wird auch Tonfrequenzbereich genannt.
Ultraschall; (auch Supraschall)	mech. Schwingungen, die oberhalb des Hörbereichs liegen: mehr als 20 000 Hz. Der Ultraschall findet heute auf fast unzähligen Gebieten der Technik Anwendung. Dazu gehören z. B. die Tiefenmessung mit dem Echolot, Materialprüfungen (Feststellung von Ribbildungen), das Herstellen von Emulsionen (Mischungen von z. B. Wasser und Öl).

Für die Fernmeldetechnik ist im wesentlichen nur der Hörschall, also die mechanischen Schwingungen im Bereich von 16 Hz . . . 20 000 Hz von Interesse.

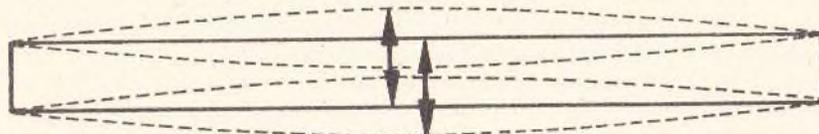
Ein fester Körper kann verschiedene Schwingungen ausführen:

Längsschwingungen (Longitudinalschwingungen)



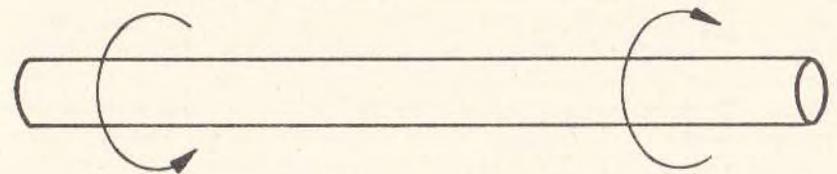
(Abb. 47)

Biegeschwingungen (Transversalschwingungen)



(Abb. 48)

Drehschwingungen (Torsionsschwingungen)



(Abb. 49)

Diese Eigenschaft führt in vielen Fällen eines mechanischen Anstoßes dazu, daß der Körper mehrere verschiedene Töne gleichzeitig erzeugt.

Man kann die Erzeugung mehrerer verschiedener Töne mit Hilfe einer Stimmgabel leicht beweisen. Eine Stimmgabel ist auf einen Grundton – z. B. Kammerton a – abgestimmt. Wird sie mit einem weichen Klöppel (Filtz, Leder, Gummi) angeschlagen, so gibt sie einen reinen Ton wieder. Schlägt man sie jedoch mit einem harten Gegenstand – z. B. Hartholzstab – an, so hört man neben dem Grundton ein metallisches Klirren. Die Stimmgabel führt also mehrere Schwingungsarten gleichzeitig aus.

Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist für die Beurteilung elektroakustischer Geräte, wie Lautsprecher, Fernhörer und Mikrofone wichtig. So erzeugen Fernhörer mit Metallmembran meistens einen für sie typischen metallischen Klang, d. h. sie geben nicht nur den gewünschten Grundton wieder, sondern erzeugen unerwünschte zusätzliche Töne. Aus diesem Grunde werden die Membranen der modernen Hörkapseln aus Kunststoffen und die der Lautsprecher aus einer Papierfaser-masse hergestellt.

Gasförmige und flüssige Stoffe führen beim Anstoß nur Längsschwingungen aus.

Je nach Zusammensetzung einer Schallinformation aus verschiedenen Tönen oder Schwingungen unterscheidet man zwischen

- Ton:** reine sinusförmige Schwingung (Stimmgabel/Meßton),
- Klang:** aus mehreren sinusförmigen Schwingungen zusammengesetzt, deren Frequenz in einem bestimmten, **harmonischen** – meistens ganzzahligen – Verhältnis zueinander stehen (Musikinstrumente),
- Geräusch:** Gemisch aus Tönen deren Frequenzen in einem willkürlichen, **unharmonischen Verhältnis** zueinander stehen (Rauschen/Strabengeräusch),
- Knall:** Schallstoß mit großer Schallstärke – zusammengesetzt aus einer Vielzahl von unharmonischen Schwingungen (Explosion, Schlag).

5.2. Die Schallausbreitung

Bei der Schallausbreitung wird der Stoff in der Umgebung der Schallquelle (fester Stoff, Luft usw.) in Schwingungen versetzt. Dabei entstehen Druckschwankungen. Diese Druckschwankungen nennt man Schallwellen. In verschiedenen Stoffen werden die Schallwellen verschieden schnell übertragen. Dabei hängt die Schallgeschwindigkeit außer von der Art des Stoffes (Elastizität und Dichte) auch von dessen Temperatur ab. Die Angaben über Schallgeschwindigkeit werden normalerweise auf die Raumtemperatur von 15 °C bezogen, z. B.

Luft	340 m/s
Wasser	1480 m/s
Eisen	5000 m/s.
(Stahl)	

Treffen Schallwellen auf einen anderen Stoff, z. B. Luftschall auf eine Wand, so werden sie mehr oder weniger zurückgeworfen (reflektiert). Der reflektierte Schall kann zur Schallquelle zurückgeworfen werden. Da er für die zurückgelegte Entfernung eine bestimmte Zeit benötigt, wird er auch entsprechend später wahrgenommen. Beträgt der Zeitraum zwischen Wahrnehmung des direkten Schalls und reflektierten Schalls weniger als $\frac{1}{10}$ Sekunde, spricht man vom **Nachhall**. Der reflektierte Schall wird dagegen als **Echo** wahrgenommen, wenn zwischen direktem Schall und reflektiertem Schall ein Zeitraum von mehr als $\frac{1}{10}$ Sekunde liegt.

Der Schall kann gerichtet oder gebündelt werden (z. B. durch Trichter oder Hohlspiegel). Ein elastischer Körper mit bestimmten Ausmaßen schwingt bevorzugt mit einer bestimmten Frequenz. Wird er durch eine Schallquelle in dieser Frequenz angeregt, so schwingt er besonders kräftig; er befindet sich in Resonanz.

Es gibt aber auch Stoffe, die den Schall „schlucken“. Sie sind meistens von sehr lockerer Beschaffenheit, besitzen viele Hohlräume. Diese Schallschluckstoffe spielen in der Hochbautechnik und Bauakustik eine große Rolle. Auch in allen Anwendungsbereichen der Elektroakustik werden zur Erzielung bestimmter Wirkungen Schallschluckstoffe verwendet (z. B. Herstellung sog. schalltoter Räume, die zur Messung akustischer Geräte dienen).

5.3. Physikalische Größen und deren Einheiten

Bevor wir uns mit den Eigenschaften des menschlichen Ohres befassen wollen, müssen wir uns mit den wichtigsten physikalischen Begriffen und Maßeinheiten vertraut machen.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Schallgeschwindigkeit	c	m/s

Man versteht darunter die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls (bezogen auf den Stoff, in dem sich der Schall ausbreitet, und auf die Temperatur).

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Tonhöhe	f	Hz

Sie gibt die Schwingungszahl des Schalls in der Sekunde – also die Frequenz – an.

Tiefer Ton = niedrige Frequenz, z. B. 50 Hz,
hoher Ton = hohe Frequenz, z. B. 10000 Hz.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Lautstärke	$A^1)$	phon

Die Maßeinheit der Lautstärke berücksichtigt die Eigenarten des menschlichen Ohres in bezug auf die Empfindung für die „Lautheit“ des Schalls (vgl. hierzu unter 5.4.: „Das menschliche Ohr“). Die Lautstärke gibt also an, wie laut der Schall bei einem bestimmten Schalldruck vom menschlichen Ohr empfunden wird. Sie hängt nicht linear vom Schalldruck ab.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Schalldruck	p	μbar (Mikrobar)

Darunter versteht man den durch die Schallschwingung hervorgerufenen Wechseldruck je Flächeneinheit.

Der wechselnde Schalldruck zwingt den Empfänger (z. B. Trommelfell des Ohres oder Membran eines Mikrofons), der Schwingung zu folgen. Die Kraftwirkung des Schalls ist im allgemeinen sehr klein. Daher ist auch die Einheit Mikrobar gebräuchlich (Luftdruckangaben werden in Millibar gemacht!):

$$1 \text{ Mikrobar} = 1 \mu\text{bar} = \frac{1 \text{ dyn}}{\text{cm}^2} \text{ entspricht etwa } \frac{1 \text{ mg}}{\text{cm}^2} .$$

Die Empfindlichkeit von Mikrofonen wird meistens dadurch ausgedrückt, wie hoch die abgegebene Spannung bei Beschallung mit einem Schalldruck von 1 μbar ist, z. B. Empfindlichkeit 0,25 mV/ μbar .

5.4. Das menschliche Ohr

Der Schall wird vom menschlichen Ohr aufgenommen und über das Nervensystem in Hörempfindungen umgewandelt. Dabei geschieht die mechanische Übertragung durch Trommelfell – Hammer – Amboß – Steigbügel zum inneren Ohr (sog. Schnecke).

¹⁾ sprich: Lambda

In der Schnecke des inneren Ohres befindet sich eine Vielzahl von Nervenfasern unterschiedlicher Länge. Beim Auftreffen von Schall auf das Ohr geraten diese Nervenfasern in Schwingungen und üben einen Nervenreiz auf die Hörzellen des Gehirns aus.

5.4.1. Das Hörvermögen für Tonhöhen

Der größtmögliche Tonfrequenzbereich, den der Mensch wahrnehmen kann, geht von 16 Hz bis 20000 Hz. Die untere und obere Grenze liegt bei verschiedenen Menschen sehr unterschiedlich. Vor allem das Hörvermögen für hohe Frequenzen nimmt mit zunehmendem Alter stark ab.

Gegenüber Tonhöhenschwankungen ist das Ohr verhältnismäßig empfindlich.

So werden z. B. im Bereich oberhalb 500 Hz Tonhöhenschwankungen von etwa 0,3% bereits wahrgenommen. Diese Empfindlichkeit bedingt einen hohen Aufwand bei der Herstellung von elektroakustischen Aufnahme- und Wiedergabegeräten, wie Schallplattengeräten und Tonbandgeräten.

Ihre Gleichlaufgenauigkeit muß bei hohen Ansprüchen (HiFi-Geräte) besser als 0,3% sein. Bei Studioplattenspielern erreicht man heute Gleichlaufgenauigkeiten von etwa 0,1%.

5.4.2. Die Hörfläche

Damit eine Schallinformation überhaupt vom Ohr wahrgenommen werden kann, muß der Schalldruck einen bestimmten Mindestwert haben. Dieser Mindestwert wird als **Hörschwelle** bezeichnet. Es zeigt sich jedoch, daß die Hörschwelle für verschiedene Tonhöhen verschieden hoch liegt. Das bedeutet:

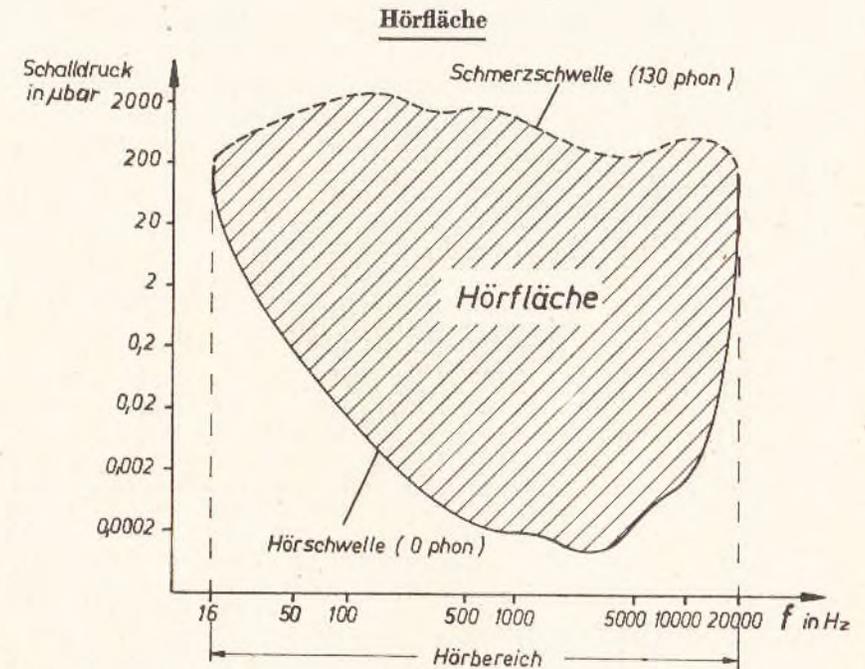
Das menschliche Ohr ist für die verschiedenen Frequenzen des Hörbereichs nicht gleich empfindlich.

Die größte Empfindlichkeit besitzt das Ohr für Frequenzen von etwa 1000 Hz bis 4000 Hz.

Um sehr tiefe oder hohe Töne überhaupt wahrnehmen zu können, muß der Schalldruck erheblich erhöht werden (z. B. für 30 Hz rd. 1000mal so hoch wie für 1000 Hz). Für Meßzwecke benutzt man daher gerne Tonfrequenzen im Bereich um 1000 Hz, da somit die größte Meßgenauigkeit (z. B. in Meßbrücken mit Kopfhörern als „Nullinstrument“) erreicht wird. Wird der Schalldruck bei einem bestimmten Ton immer weiter erhöht, so wird der Schall von einem bestimmten Schalldruck ab als

Schmerz empfunden. Diese obere Schalldruckgrenze wird als **Schmerzschwelle** bezeichnet.

Die Eigenschaften des menschlichen Ohres werden in der sog. Hörfläche dargestellt.



Aus der Hörfläche lassen sich wichtige Erkenntnisse entnehmen, die für die Konstruktion elektroakustischer Übertragungseinrichtungen große Bedeutung haben.

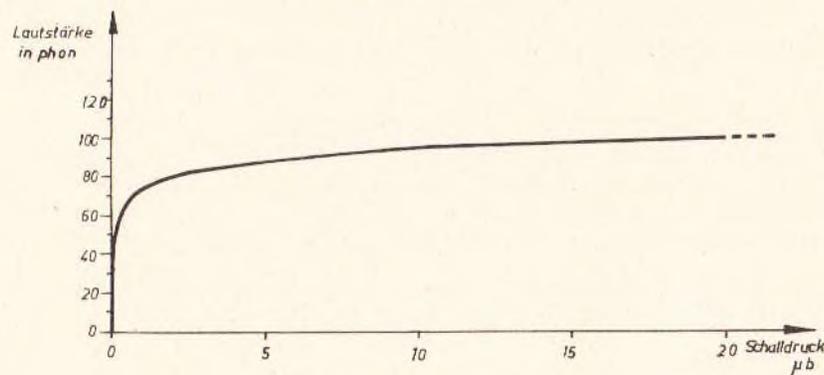
Soll ein elektroakustisches Gerät z. B. bei geringer Lautstärke einen breiten Tonfrequenzbereich wiedergeben, so müssen die tiefen und hohen Frequenzen gegenüber den mittleren mit höherem Schalldruck abgestrahlt werden; im anderen Fall würde der Klang erheblich beeinträchtigt.

5.4.3. Das Lautstärke-Hörvermögen

Gegenüber Schalldruckunterschieden ist das menschliche Ohr verhältnismäßig unempfindlich.

Steigert man bei einem bestimmten Ton den Schalldruck von der Hörschwelle ab gleichmäßig, so wird die Hörempfindung keinesfalls gleichmäßig lauter. **Das Ohr besitzt nämlich ein annähernd logarithmisches Lautstärkeempfinden.** Da der mathematische Begriff Logarithmus nicht allgemein bekannt sein dürfte, wollen wir versuchen, das Hörvermögen für die Lautstärke anhand eines logarithmischen Diagramms zu erklären. Abb. 51 zeigt die Abhängigkeit der Lautstärke vom Schalldruck.

Die logarithmische Abhängigkeit der Lautstärke vom Schalldruck



(Abb. 51)

Aus dem Diagramm ergibt sich:

- steigert man den Schalldruck oberhalb der Hörschwelle, so wächst die Empfindung zunächst sehr stark an;
- geringe Schalldruckänderungen in der Nähe der Hörschwelle werden also noch als verhältnismäßig große Lautstärkeänderungen empfunden;
- je mehr der Schalldruck aber wächst, desto geringer steigt die Lautstärkeempfindung an.

Überschläglich kann etwa gesagt werden, daß ein doppelter Schalldruck in der Nähe der Hörschwelle gerade als Lautstärkesteigerung, ein zehnfacher Schalldruck jedoch als Verdoppelung der Lautstärke empfunden wird.

Bei Annäherung an die Schmerzschwelle wird eine Verdopplung des Schalldrucks kaum, eine Verzehnfachung des Schalldrucks gerade als Lautstärkeänderung empfunden.

Das sog. logarithmische Lautstärkeempfinden des menschlichen Ohres wird in der Maßeinheit der Lautstärke – phon – berücksichtigt. Der Voll-

ständigkeit halber sei hier erwähnt, daß der sog. Schallpegel nach der Formel

$$A = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ (phon)}$$

berechnet werden kann, wenn man für p den tatsächlichen Schalldruck und für p_0 den Schalldruck an der Hörschwelle in μbar einsetzt.

Der Empfindungsbereich für die Lautstärke liegt zwischen 0 phon (Hörschwelle) und 130 phon (Schmerzschwelle).

Als Richtwerte sind in der nachfolgenden Tabelle die Lautstärken bekannter Schallquellen aufgeführt:

Schallquelle	Lautstärke A in phon	Schalldruck in μbar
Hörschwelle	0	$2 \cdot 10^{-4}$
leises Flüstern, Blätterrauschen	10	$6 \cdot 10^{-4}$
Ticken von Uhren, ruhiger Garten	20	$2 \cdot 10^{-3}$
Flüstern	30	$6 \cdot 10^{-3}$
Zerreißen von Papier, gedämpfte Unterhaltung	40	$2 \cdot 10^{-2}$
Umgangssprache, Schreibmaschine	50	$6 \cdot 10^{-2}$
laute Unterhaltung, Staubsauger	60	$2 \cdot 10^{-1}$
starker Straßenlärm, Straßenbahn	70	$6 \cdot 10^{-1}$
Autohupen, laute Rundfunkmusik	80	2
Preßluftbohrer, Kreissäge	90	6
Niethammer, Motorräder	100	20
Kesselschmiede, Flugzeugmotor in 4 m Abstand	110	60
Preßlufthammer, Düsentriebwerk in der Nähe	120	200
Schmerzschwelle	130	600

Beachtenswert dürfte sein, daß das Ohr Schalldruckunterschiede von 1 zu 1 Million noch als Hörempfindung zu verarbeiten vermag.

Auch auf das logarithmische Lautstärkeempfinden muß bei der Konstruktion elektroakustischer Geräte Rücksicht genommen werden. So müssen z. B. Lautstärke-Regelwiderstände (Potentiometer) bei gleichmäßiger Drehung eine logarithmische Widerstandsänderung bewirken, damit eine gleichmäßige Lautstärkeänderung vorgenommen werden kann. Solche Lautstärkeregler werden durch den Zusatz „log“ hinter der Widerstandsangabe gekennzeichnet.

Da bei Fernhörern eine unmittelbare Kopplung zwischen Schallquelle und Ohr gegeben ist, **genügt bereits eine elektrische Leistung von 10^{-12} W zur Ansteuerung, um einen 1000-Hz-Ton hörbar zu machen (Hörschwelle).** Für eine normallaute Verständigung benötigt ein Fernhörer eine elektrische Leistung von ca. 0,1 mW (50 phon).

5.5. Die elektroakustische Übertragung

Zur Übertragung von Schallinformationen, wie Musik und Sprache, über weite Entfernungen kann man sich nicht des Luftschalls bedienen. In der elektrischen Nachrichtentechnik wird der Schall zur Übermittlung beim Sender in elektrische Energie umgewandelt und beim Empfänger wieder in Schall. Eine noch wenig gebräuchliche Energieform ist die Lichtenergie, die allerdings in letzter Zeit durch die Entwicklung des sog. Lasers an Bedeutung für die Nachrichtenübermittlung gewinnt.

5.5.1. Frequenzbereich/Übertragungsbereich

Für die Übertragung von Musik wäre ein Frequenzband von 20 bis 18000 Hz erforderlich, damit eine naturgetreue Wiedergabe möglich ist. Die Musikinstrumente erzeugen neben den Grundtönen eine mehr oder weniger große Zahl an Oberschwingungen. Diese Oberschwingungen bewirken eine ganz bestimmte, dem Musikinstrument eigene Klangfarbe. Die Klangfarbe wird aber erheblich beeinträchtigt, wenn die Oberschwingungen (bis 18 kHz) nicht übertragen werden. Beschneidet man bei einer Musikübertragung die hohen Frequenzen, so kann man unter Umständen eine Violine nicht mehr von einer Flöte unterscheiden.

Ähnlich ist es bei der Sprache. Ihr **Tonfrequenzbereich liegt etwa zwischen 200 Hz und 8000 Hz.** An bestimmten Oberschwingungen, die die Klangfarbe beeinflussen, kann man den Sprecher häufig erkennen. Wird das Frequenzband beschnitten (schmäler gemacht), dann ist vielleicht noch das gesprochene Wort verständlich, der Sprecher jedoch nicht mehr erkennbar.

Bei der Übertragung von Schallinformationen unterscheidet man daher zwischen

Natürlichkeit (Rundfunk) und Verständlichkeit (Fernsprechen).

Aus wirtschaftlichen Gründen kann man jedoch nicht immer das vollständige Frequenzband übertragen. So werden je nach Anforderung die Frequenzbereiche oben und unten beschnitten. Eine Begrenzung des Frequenzbandes für die Übertragung von Musik auf 30 bis 16000 Hz (Hi-Fi-Norm) läßt gegenüber der Originaldarbietung kaum einen Unterschied erkennen. Im Leitungsnetz der Bundespost wird zur Zeit für Rundfunkdarbietungen (Musik) ein Frequenzband von ca. 30 bis 12000 Hz übertragen.

Mit einer Erweiterung des Frequenzbandes für die Rundfunkübertragung auf Leitungen bis ca. 16000 Hz ist in Kürze zu rechnen.

Noch anders liegen die Verhältnisse bei der Übertragung von Sprache (Fernsprecher). Hier kommt es in erster Linie darauf an, daß der Inhalt der Nachricht verstanden wird. Aus diesem Grunde wird das Frequenzband für das Fernsprechen mit Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit noch stärker begrenzt, nämlich auf den Bereich von 300 bis 3400 Hz.

Die Verständlichkeit beim Fernsprechen wird nach einem international gebräuchlichen Verfahren ermittelt:

Über eine Fernsprechverbindung werden von einem Sprecher zusammenhanglose Silben, sog. Logatome, gesprochen und auf der Empfangsseite von mehreren Personen abgehört und mitgeschrieben. Als Silbenverständlichkeit berechnet man dann den Prozentsatz der richtig verstandenen Silben.

Unter Silbenverständlichkeit versteht man den prozentualen Anteil der richtig verstandenen Silben von der Gesamtzahl der Silben (Logatome), die über einen Übertragungsweg (z. B. Fernsprechleitung) übermittelt werden.

Die Angabe 75% Silbenverständlichkeit bedeutet also, daß 75 von 100 übermittelten Silben richtig verstanden worden sind.

Logatome sind Silben, die völlig zusammenhanglos und ohne Sinnbedeutung zusammengestellt werden. Sie enthalten die Vokale und Konsonanten in der gleichen Häufigkeit, wie sie in der betreffenden Sprache vorkommen. Hier einige Beispiele für Logatome:

map	stes	bis	sub	tet	rek	bag
lid	fiz	gors	hirs	pram	sim	ver
straf	kie	men	spek	stil	ral	nast
sur	lep	jost	nut	geg	nus	kran
sas	fit	bong	brin	dom	stut	bris

Die normale Umgangssprache setzt sich jedoch nicht aus solchen willkürlich zusammengestellten Silben zusammen. Es ist viel einfacher, den Inhalt eines vollständigen Satzes zu verstehen, der einen Sinn hat. Dazu brauchen nicht unbedingt alle Sprachfrequenzen übertragen zu werden. Das menschliche Gehirn ergänzt nämlich automatisch nach dem gewohnten Klangbild der Sprache nicht übertragene Laute dazu, so daß der Inhalt der gesprochenen Sätze trotz Frequenzbandbegrenzung nahezu vollständig richtig verstanden wird.

Den Anteil der richtig verstandenen Sätze von der Gesamtzahl der über einen Übertragungsweg übermittelten Sätze (die einen Sinn haben) bezeichnet man als Satzverständlichkeit.

Die Satzverständlichkeit wird ebenso wie die Silbenverständlichkeit in Prozent ausgedrückt.

Es leuchtet ein, daß die **Verständlichkeit ganzer Sätze mit Sinnbedeutung bei gleicher Übertragungsgüte höher liegt als die Silbenverständlichkeit.** Zahlreiche praktische Versuche haben ergeben, daß z. B. bei einer Silbenverständlichkeit von 75% eine Satzverständlichkeit von mehr als 95% erreicht wird.

Wir müssen nun berücksichtigen, daß selbst bei der Übertragung des vollen Sprachfrequenzbandes Hörfehler auftreten. Eine Satzverständlichkeit von 100% kann daher nie erreicht werden (z. B. ist die Unterscheidung von „einen“ und „einem“ oder „Hain“ und „Heim“ gehörmäßig kaum möglich). Die höchste überhaupt erreichbare Satzverständlichkeit liegt bei etwa 97 bis 98%.

Ein Übertragungsweg, der eine Silbenverständlichkeit von etwa 80% gewährleistet, genügt daher den Anforderungen. Untersuchungen haben gezeigt, daß dazu ein Frequenzbereich von 300 bis 2100 Hz erforderlich ist. Wenn man den Frequenzbereich beim Fernsprechen trotzdem auf 300 bis 3400 Hz festgelegt hat, so kommt das weniger der Verständlichkeit, sondern vielmehr der Natürlichkeit zugute.

Bei der Festlegung dieses Frequenzbereichs dürfte gewiß auch die Überlegung eine Rolle mitgespielt haben, daß sich Fernsprechteilnehmer infolge Ausweitung des internationalen Fernmeldeverkehrs immer häufiger in einer Fremdsprache unterhalten. Eine Fremdsprache wird im allgemeinen schwieriger verstanden als die Muttersprache.

Anhand der dargestellten Überlegungen fassen wir zusammen:

Bei der Übertragung von Musik (Rundfunkdarbietungen) muß das volle Frequenzband der Musikinstrumente wiedergegeben werden. Dazu ist ein breites Frequenzband von ca. 30 bis 16000 Hz erforderlich. Man fordert Natürlichkeit. Beim Fernsprechen genügt ein Frequenzband von 300 bis 3400 Hz der Anforderung Verständlichkeit vollauf.

5.6. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 5.1. bis 5.5.

1. Was versteht man unter Akustik bzw. Elektroakustik? 2. Was ist Schall? 3. Warum wird Schall nicht durch einen luftleeren Raum übertragen? 4. Erläutern Sie die Begriffe Infraschall, Hörschall und Ultraschall! 5. Nennen Sie Anwendungsbereiche für die drei vorgenannten Frequenzbereiche des Schalls! 6. Welche Art Schwingungen kann ein fester Körper ausführen? 7. Erläutern Sie die Begriffe Ton, Klang, Geräusch und Knall! 8. Wovon hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls ab? 9. In welcher Maßeinheit wird die Schallgeschwindigkeit gemessen und wie groß sind die Schallgeschwindigkeiten in Luft, Stahl und Wasser? 10. Unter welchen Voraussetzungen entsteht Nachhall oder Echo? 11. Erläutern Sie die Begriffe Tonhöhe, Lautstärke und Schalldruck und geben Sie die entsprechenden Maßeinheiten an! 12. Wie reagiert das menschliche Ohr auf Tonhöhenchwankungen? 13. Welcher Tonfrequenzbereich wird vom menschlichen Ohr wahrgenommen? 14. Für welche Frequenzen besitzt das Ohr die größte, für welche die geringste Empfindlichkeit? 15. Wie empfindet das Ohr Schalldruckunterschiede? 16. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Schalldruck und Lautstärke? 17. Zwischen welchen Phonwerten wird Schall noch vom Ohr als Ton wahrgenommen? 18. Welcher Frequenzbereich ist für eine naturgetreue Übertragung von Musik erforderlich? 19. Welchen Frequenzbereich umfaßt die menschliche Sprache? 20. Warum wird beim Fernsprechen nicht der gesamte Sprachfrequenzbereich übertragen? 21. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Natürlichkeit und Verständlichkeit! 22. Was versteht man unter Silbenverständlichkeit? 23. Was sind Logatome? 24. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Silben- und Satzverständlichkeit? 25. Warum kann praktisch keine hundertprozentige Satzverständlichkeit erzielt werden? 26. Wie groß müßte die Silbenverständlichkeit und der zugehörige Frequenzbereich beim Fernsprechen für eine befriedigende Übertragung mindestens sein? 27. Wie groß ist heute der beim Fernsprechen tatsächlich benutzte Frequenzbereich? 28. Warum ist dieser Bereich größer als notwendig?

5.7. Elektroakustische Wandler (Mikrofone, Fernhörer)

Zur elektroakustischen Übertragung von Sprache und Musik muß auf der „Sendeseite“ die Schallenergie in elektrische Energie umgewandelt und auf der „Empfangsseite“ des Übertragungsweges die elektrische Energie wieder in Schallenergie zurückverwandelt werden. Die dazu erforderlichen Energiewandler sind Mikrofone (Sender) und Fernhörer bzw. Lautsprecher (Empfänger).

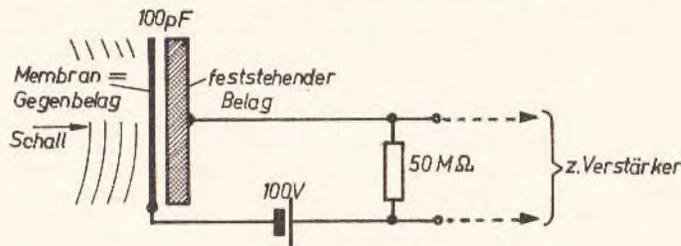
5.7.1. Mikrofone

In der Elektroakustik sind heute im wesentlichen sechs Mikrofonarten gebräuchlich. Da der Fernmeldetechniker neben dem in der Fernsprechtechnik noch verwendeten Kohlemikrofon auch die anderen Mikrofonarten kennen sollte, gehen wir hier kurz auf den Aufbau und die Wirkungsweise der verschiedenen Arten ein.

5.7.1.1. Das Kondensatormikrofon

Es wird dargestellt durch einen Kondensator, bei dem der eine Belag fest angeordnet ist und der Gegenbelag durch eine sehr dünne Membran aus leitendem Material gebildet wird.

Schematischer Aufbau eines Kondensatormikrofons



(Abb. 52)

Zum Betrieb ist eine Gleichspannungsquelle erforderlich. In Reihe mit der Kondensatorkapazität (ca. 100 pF) und der Spannungsquelle (ca. 100 V) liegt ein hochohmiger Widerstand (ca. 50 M Ω). Im Ruhezustand lädt sich der Kondensator über den hochohmigen Widerstand auf. Wird gegen die Membran gesprochen, so verändert sich infolge der Schalldruckschwankungen der Abstand zwischen den beiden Kondensatorbelägen. Bei zunehmendem Schalldruck wird der Abstand geringer und die Kapazität größer, bei abnehmendem Schalldruck dagegen wird der Abstand größer und die Kapazität kleiner.

Die Auswirkung der Kapazitätsänderungen kann man sich vereinfacht so vorstellen:

Größere Kapazität bedeutet größeres Fassungsvermögen. Der Kondensator nimmt zusätzliche elektrische Energie aus der Spannungsquelle auf. Es fließt also ein Ladestrom zum Kondensatormikrofon. Infolge des Stroms tritt am hochohmigen Widerstand ein Spannungsabfall ($U = I \cdot R$) auf.

Kleinere Kapazität bedeutet vermindertes Fassungsvermögen. Der Kondensator entlädt sich wieder. Damit fließt ein Entladungsstrom vom Kondensator ab. Dadurch wird wiederum ein Spannungsabfall am Hochohmwiderstand verursacht, aber diesmal in entgegengesetzter Richtung.

Infolge der Schalldruckschwankungen tritt also am Hochohmwiderstand eine Wechsellspannung auf.

Das Kondensatormikrofon gilt zur Zeit als das hochwertigste Mikrofon überhaupt. Die am Hochohmwiderstand auftretende Spannung ist direkt vom Schalldruck abhängig. Daraus ergibt sich eine hohe, über den gesamten Frequenzbereich gleichmäßige Übertragungsgüte. Daher wird das Kondensatormikrofon für Musik- und Gesangsaufnahmen beim Rundfunk bevorzugt.

Der Nachteil des Kondensatormikrofons ist, daß man nur sehr kurze Anschlußleitungen zum Verstärker verwenden darf, da die Mikrofonkapazität mit ca. 100 pF sehr klein ist. Eine wenige Meter lange Verbindungsleitung hat unter Umständen schon eine Kapazität von 1000 pF, so daß sich die Kapazitätsänderungen des Mikro-

fons kaum noch auswirken. Aus diesem Grunde wird unmittelbar in das Gehäuse des Kondensatormikrofons ein Verstärker (Röhren- bzw. Transistorverstärker) eingebaut. Damit ist aber ein erhöhter Aufwand zum Betrieb des Mikrofons erforderlich: **Die Stromversorgung des Verstärkers muß durch zusätzliche Leitungen im Anschlußkabel sichergestellt werden.** Die Empfindlichkeit eines Kondensatormikrofons einschließlich Verstärker beträgt etwa 1 mV/ μ bar.

5.7.1.2. Dynamische Mikrofone

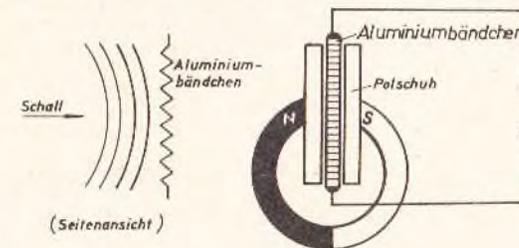
Sie arbeiten nach dem elektrodynamischen Prinzip:

Bei Bewegung eines Leiters im Magnetfeld wird infolge der Änderung des magnetischen Flusses eine Induktionsspannung erzeugt. Bei den dynamischen Mikrofonen müssen wir unterscheiden zwischen

dem dynamischen Bändchenmikrofon und
dem dynamischen Tauchspulenmikrofon.

Beim dynamischen **Bändchenmikrofon** wird ein geriffeltes Aluminiumbändchen (geringes Gewicht!) zwischen die langgestreckten Weicheisenpolschuhe eines Dauermagneten gespannt. Die Riffelung soll eine gewisse Beweglichkeit des Bändchens gewährleisten. Das Aluminiumbändchen dient als Membran.

Schematischer Aufbau eines dynamischen Bändchenmikrofons

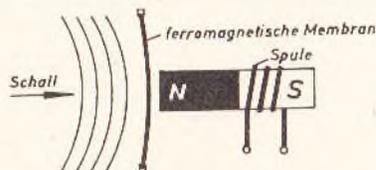


(Abb. 53)

Treffen Schallwellen auf das Bändchen, so gerät es in Schwingungen. Dabei wird der magnetische Fluß um das Bändchen (= Leiter!) entweder verstärkt oder geschwächt und somit eine Induktionsspannung wechselnder Richtung erzeugt. Die Höhe der induzierten Spannung hängt von der Induktion B im Luftspalt zwischen den Polschuhen, der wirksamen Leiterlänge l und der Bewegungsgeschwindigkeit v des Leiters ab. Da aber die Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters (Bändchen) bei gleich lauter Beschallung mit einem hohen Ton = hohe Frequenz größer ist als bei Beschallung mit einem tiefen Ton = niedrige Frequenz, **steigt die Höhe der vom Bändchenmikrofon abgegebenen Wechsellspannung mit der Frequenz an.** Man sagt: Das Mikrofon besitzt einen steigenden Frequenzgang. Diese Eigenschaft eines dynamischen Mikrofons wird allerdings zum Teil durch die Massenträgheit des beweglichen Teils (Bändchen) aufgehoben.

ferromagnetische Membran vom Dauermagneten, so wird der Luftspalt größer und der magnetische Fluß schwächer. Die Änderungen des magnetischen Flusses haben in der auf den Magneten gewickelten Spule eine Induktionsspannung zur Folge.

Schematischer Aufbau eines magnetischen Mikrofons



(Abb. 56)

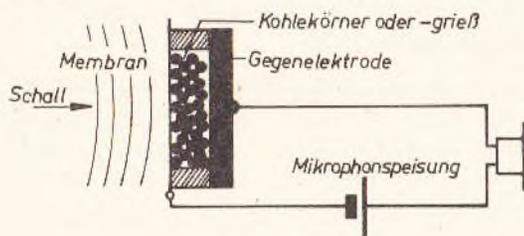
Magnetische Mikrofone haben heute eine nur noch geringe Bedeutung, es sei denn, sie lösen in absehbarer Zeit in der Fernsprechtechnik das Kohlemikrofon ab.

5.7.1.5. Das Kohlemikrofon

Die unter 5.7.1.1. bis 5.7.1.4. besprochenen Mikrofone eignen sich nicht ohne weiteres für das Fernsprechen, weil zum Teil der technische Aufwand zu groß ist (Kondensatormikrofon) oder die Mikrofone zu teuer sind und die von ihnen abgegebene Wechselstromenergie zu gering ist. Selbst bei kürzesten Fernsprechleitungen ist eine genügende Verstärkung bei Verwendung dieser Mikrofonarten nicht erreichbar. Um die gleiche Wechselstromleistung wie mit einem Kohlemikrofon zu erzielen, müßte man bei anderen Mikrofonarten Verstärker einsetzen. Dies ist zu aufwendig, deshalb wird in der Fernsprechtechnik das Kohlemikrofon verwendet.

Das Kohlemikrofon stellt einen elektrischen Widerstand dar, dessen Größe sich unter der Einwirkung von Schallwellen ändert.

Schematischer Aufbau eines Kohlemikrofons



(Abb. 57)

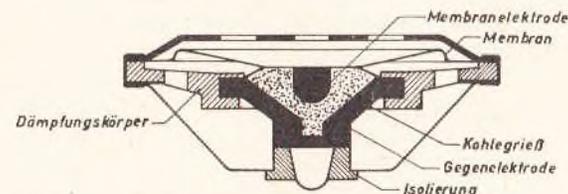
Treffen Schallwellen auf die Membran, so übt sie – den Schalldruckschwankungen folgend – auf die Kammer mit Kohlekörnern oder Kohlegrieß Druck oder Unterdruck aus. Dadurch werden die Kohlekörner entweder zusammengedrückt – der Widerstand des Mikrofons wird kleiner –, oder sie liegen nur sehr lose aneinander – der Mikrowiderstand wird größer. Zum Betrieb des Kohlemikrofons ist eine Stromquelle erforderlich. Infolge der Widerstandsänderungen entstehen im Mikrofonstromkreis Stromschwankungen, die im Fernhörer hörbar gemacht werden können. Man sagt: **Der Mikrofongleichstrom ist „moduliert“** worden.

Das Kohlemikrofon ist ein druckabhängiger Widerstand und kein Energiewandler, d. h. es gibt bei Beschallung keine elektrische Energie ab. Zum Betrieb ist immer eine Gleichstromspeisung notwendig.

Das in der Abb. 57 schematisch dargestellte Kohlemikrofon ist nur in senkrechter Lage betriebsfähig. In waagerechter Lage würden sich Kohlekörner bzw. Kohlegrieß in der Kammer flach verteilen und damit den Stromkreis unterbrechen. Dieser Mangel wird bei modernen Bauarten durch die besondere Formgebung einer Membranelektrode (Halbkugel) und der Gegenelektrode (konische Form etwa wie ein Trichter) beseitigt.

Die folgende Abb. zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer modernen Kohlemikrofon-Kapsel.

Aufbau eines modernen Kohlemikrofons



(Abb. 58)

Der Übertragungsbereich dieser Kapsel liegt zwischen etwa 100 und 4000 Hz und reicht daher für die Anwendung zum Fernsprechen aus.

Bei der im öffentlichen Fernsprechnetz üblichen Mikrophonspeisung (meistens 60 V) ist eine ausreichende Verstärkung im Fernmeldeleitungsnetz bis zu einer Entfernung von etwa 30 km möglich. Trotz ständiger Verbesserungen haften dem Kohlemikrofon immer noch erhebliche Nachteile an, z. B. Verzerrung der Sprache, Zusammenfritzen des Kohlegrießes, Verbrennung des Kohlegrießes, Auftreten von unerwünschten Nebengeräuschen und Änderung der Empfindlichkeit bei verschiedener Mikrofonlage. Daher wird das Kohlemikrofon in absehbarer Zeit durch einen Mikrontyp besserer Klangqualität ersetzt werden.

Es ist beabsichtigt, an Stelle des Kohlemikrofons künftig eine magnetische oder dynamische Sprechkapsel zu verwenden. (Im Aufbau gleichen diese der magnetischen bzw. dynamischen Hörkapsel.) Der zugehörige Transistorverstärker wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht in der Mikrofonskapsel selbst, sondern auf der Leiterplatte des FeAp 61 (Steckverbindungen v 1 bis v 4) untergebracht. Den Speisestrom des Verstärkers kann man, wie bisher den Mikrofonsstrom, der Amtsbatterie entnehmen. Die Stromstärke liegt in der gleichen Größenordnung. Der Einsatz besserer Mikrofonarten ist heute durch die Entwicklung kleiner, preiswerter Transistorverstärker möglich geworden.

Zum Ausgleich der unterschiedlichen Verluste (Dämpfung) in den verschiedenen langen Teilnehmerleitungen werden je nach Leitungswiderstand Mikrofonskapseln der Gruppen-Nr. I, II oder III eingesetzt.

Die mit einem Mikrofon erreichbare Wechselstromleistung steigt bei gleicher Besprechungslautstärke mit der römischen Ziffer. Eine Sprechkapsel der Gruppe III wirkt also am „lautesten“.

5.7.2. Fernhörer

Um die bei der Besprechung eines Mikrofons erzeugten Stromschwankungen (el. Energie) wieder in Schallwellen (mech. Energie) umzuwandeln, verwendet man im Fernsprechapparat Hörkapseln, in anderen Geräten auch Lautsprecher. Die gebräuchlichen Hörkapseltypen arbeiten entweder nach dem magnetischen oder dynamischen Prinzip. Lautsprecher haben grundsätzlich ähnlichen Aufbau wie die entsprechenden Hörkapseln. Bei ihnen ist lediglich die Membran größer und aus einer Papierfaser-Masse hergestellt.

5.7.2.1. Magnetische Hörkapseln

Zu dieser Typengruppe zählen

- der magnetische Hörer (auch elektromagnetischer Hörer),
- der Ringmagnethörer und
- der Ringankerhörer.

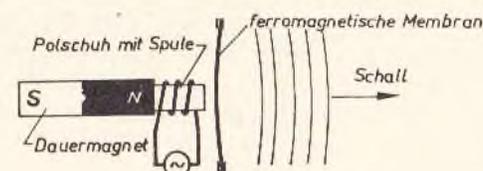
Der grundsätzliche Aufbau ist bei allen dreien der gleiche: Dauermagnet mit Weicheisenpolschuhen und Wicklung sowie eine ferromagnetische Membran.

5.7.2.1.1. Einfacher magnetischer Hörer (elektromagnetischer Hörer)

Beim magnetischen Hörer älterer Bauart wird die Membran durch den Dauermagneten mechanisch vorgespannt. Diese Tatsache ist unerwünscht, da sie zu Verzerrungen führt.

Wird nun an die Wicklung eine Wechselspannung gelegt, so ist das in der Wicklung einschließlich Polschuh entstehende Magnetfeld einmal mit dem Dauermagnetfeld gleichgerichtet (Verstärkung) und einmal dazu entgegengesetzt gerichtet (Schwä-

Schematischer Aufbau eines magnetischen Hörers



(Abb. 59)

chung). Dadurch wird die Kraftwirkung auf die Membran als Folge der magnetischen Influenz entweder verstärkt oder geschwächt. Die Membran schwingt im Rhythmus der angelegten Wechselspannung um ihre Ruhelage. Sie erzeugt damit in der umgebenden Luft Druckschwankungen, die als Schallwellen wahrgenommen werden können.

Der Dauermagnet hat einen erheblichen Einfluß auf die Güte der Übertragung. Hätte die Wicklung nur einen Weicheisenkern, so würde die Membran sowohl während der positiven als auch während der negativen Halbwelle der angelegten Wechselspannung angezogen. Sie würde also mit der doppelten Frequenz schwingen und zudem noch eine Vielzahl von Oberschwingungen erzeugen, die sich als „Klirren“ äußern. Damit eine Hörkapsel genügend laut ist, muß der Dauermagnet entsprechend kräftig sein.

Der Dauermagnet hat in einer Hörkapsel die Aufgabe, eine Frequenzverdoppelung zu vermeiden. Er muß kräftig genug sein, um eine hohe Empfindlichkeit zu erzielen.

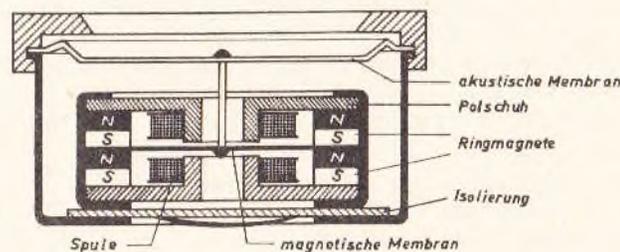
Die völlig ebene, am Rand eingespannte Metallmembran zeigt ausgesprochene Resonanzeigenschaften. Dadurch werden Töne, die der Resonanzfrequenz (etwa zwischen 1000 und 2000 Hz) entsprechen, besonders lautstark wiedergegeben, tiefere und höhere Töne dagegen wesentlich schlechter. Wegen der geringen Übertragungsgüte werden die magnetischen Hörkapseln älterer Bauart nicht mehr eingesetzt. Auf Abbildung und Beschreibung kann daher verzichtet werden.

5.7.2.1.2. Ringmagnethörer

Merkmal der moderneren, nach dem magnetischen Prinzip arbeitenden Hörkapseltypen ist der Fortfall der Membranvorspannung durch den Dauermagneten. Die ferromagnetische Membran wird genau in der Mitte zwischen den Polschuhen zweier Ringmagnete angeordnet. Daher wird die Membran von keinem Polschuh angezogen. Die Polschuhe sind flanschartig ausgebildet und tragen die Wicklung. Bemerkenswert ist, daß die ferromagnetische Membran selbst nicht zur eigentlichen Schallerzeugung dient. Durch einen Messingstift ist die ferromagnetische Membran

(sog. magnetische Membran) mit einer Kunststoffmembran (sog. akustische Membran) verbunden. Die Kunststoffmembran ist so geformt, daß fast die gesamte Membranfläche in sich steif ist (Einpressen von Sicken). Nur am Rande ist sie biegsam. Wird diese Membran über den Messingstift zu Schwingungen angeregt, so „pumpt“ sie gewissermaßen mit der gesamten Membranfläche. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Lautstärke. Nach diesem Grundsatz sind auch die Membranen moderner Lautsprecher konstruiert.

Aufbau des Ringmagnethörers



(Abb. 60)

Die Arbeitsweise des Ringmagnethörers kann mit der des einfachen magnetischen Hörers verglichen werden. Fließt Wechselstrom durch die Wicklung, so wird bei einer Halbwelle z. B. der Nordpol verstärkt und der Südpol geschwächt, bei der anderen Halbwelle der Südpol verstärkt, während der Nordpol geschwächt wird. Infolge der magnetischen Einflussung wird die ferromagnetische Membran jeweils zum verstärkten Pol hingezogen. Die Kraftwirkung ist hier besser als beim einfachen magnetischen Hörer, bei dem die Membran nur zu einer Seite angezogen oder losgelassen wird.

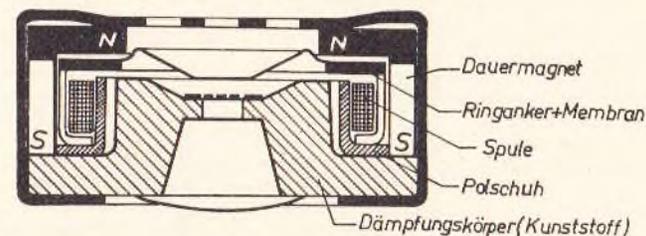
Aufgrund der Formgebung der akustischen Membran und der besseren Kraftwirkung ergibt sich eine erheblich höhere Empfindlichkeit des Ringmagnethörers. Resonanzstellen im Frequenzgang werden durch besonders sorgfältige Abstimmung der beiden gekoppelten Membranen vermieden.

5.7.2.1.3. Ringankerhörer

Er stellt die modernste Type unter den magnetischen Hörern dar. An einer Aluminium- oder Kunststoffmembran ist ein ringförmiger ferromagnetischer Anker befestigt. Die Membran ist so konstruiert, daß sie in sich steif und nur am Rande biegsam ist. Der Ringanker liegt genau in der Mitte zwischen einem Magnetpol und der Polfläche des Polschuhs, der die Wicklung trägt. Damit wird eine Vorspannung der Membran vermieden.

Fließt Wechselstrom durch die Wicklung, so wird der Ringanker entweder zum Polschuh angezogen (Verstärkung des unteren Magnetpols) oder losgelassen

Aufbau des Ringankerhörers



(Abb. 61)

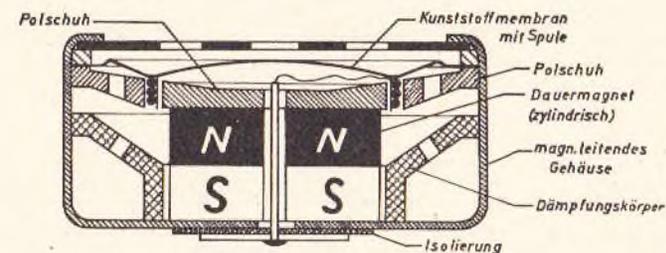
(Schwächung des unteren Magnetpols). Die Anker Auflage am Rand ist magnetisch nicht leitend.

Typisches Merkmal einer modernen Sprech- oder Hörkapsel ist ein sog. Dämpfungskörper. Er wird so bemessen, daß der in der Kapsel eingeschlossenen Luft bei in Resonanz schwingender Membran ein großer Strömungswiderstand entgegengesetzt wird. Große Schwingungsamplituden bei Resonanz werden also gedämpft. Ähnliche Hilfsmittel wendet man auch beim Bau moderner Lautsprecherboxen an.

5.7.2.2. Dynamischer Hörer

Durch einen zylindrischen Kernmagneten und einen topfartigen Weicheisenpolschuh wird ein ringförmiges radialhomogenes Magnetfeld gebildet. Eine Tauchspule, die an einer Kunststoffmembran befestigt ist, kann in diesem Ringfeld frei schwingen.

Aufbau des dynamischen Hörers



(Abb. 62)

Wird die Tauchspule von einem Wechselstrom durchflossen, so wird sie je nach Richtung des Stromes aus dem Magnetfeld herausgedrängt oder hineingezogen. Die Bewegungsrichtung läßt sich mit Hilfe der Motorregel (Linke-Hand-Regel) bestim-

men. Auch hier wird durch die Formgebung der Membran erreicht, daß sie möglichst mit der gesamten Fläche schwingt (also steife Fläche und weicher Rand).

Genauso wie der dynamische Hörer sind auch die dynamischen Lautsprecher aufgebaut.

Ringmagnethörer, Ringankerhörer und dynamischer Fernhörer übertreffen den einfachen magnetischen Hörer vor allem hinsichtlich der Klangreinheit und ausgeglichener Lautstärke für alle Übertragungsfrequenzen. Die hier beschriebenen Hörkapseln übertragen ein Frequenzband von etwa 200 Hz bis 3600 Hz. Sie haben zudem den Vorteil, daß ihre Empfindlichkeit für die höheren Frequenzen größer ist als für die tieferen. Damit werden die höheren Verluste für diese Frequenzen auf Fernsprechleitungen aufgehoben. Zum Ausgleich unterschiedlicher Leitungsdämpfungen werden je nach Leitungswiderstand Hörkapseln der Gruppen II...IV eingesetzt.

Die mit einer Hörkapsel erreichbare Lautstärke bei gleichbleibender zugeführter Wechselstromleistung steigt mit der römischen Ziffer. Eine Hörkapsel der Gruppe IV ist also am lautesten.

5.7.3. Einsatz der Kapselgruppen

Der Einsatz der Hör- und Sprechkapseln verschiedener Gruppen richtet sich nach der sog. Planungsbezugsdämpfung einer Fernsprechleitung. Diese Planungsbezugsdämpfung beträgt bei unbespulten Kabeldoppeladern:

Tabelle 1

Leiterdicke	0,4	0,6	0,6	mm
Planungsbezugsdämpfung	220	120	90	$\frac{\text{mNp}}{\text{km}}$

Für den Einsatz von Hör- und Sprechkapseln im Handapparat des FeAp 61 bei einfachen Hauptstellen gelten folgende Richtwerte (wobei seit März 1968 neben den römischen Ziffern Farbkennzeichen verwendet werden):

Tabelle 2

Höchstwert der Planungsbezugsdämpfung	Hörkapsel	Sprechkapsel
0,65 Np	II (blau)	I (blau)
0,95 Np	III (grün)	II (grün)
1,25 Np	IV (rot)	III (rot)

Durch den Einsatz der richtigen Hör- und Sprechkapseln wird für jede Sprechstelle – einerlei, ob sie im Nahbereich oder weit entfernt von einer VSt liegt – die gleiche Übertragungsgüte erreicht (Dämpfungsplan 55).

Zur Bestimmung der erforderlichen Kapselgruppen muß zunächst nach Tabelle 1 die Planungsbezugsdämpfung der Anschlußleitung berechnet werden. Die Tabelle 2 ergibt dann die einzusetzenden Kapselgruppen.

Beispiel: Eine Anschlußleitung besteht aus einer 3,2 km langen Kabeldoppelader mit 0,4 mm Aderndurchmesser.

Nach Tabelle 1 beträgt die Planungsbezugsdämpfung $220 \frac{\text{mNp}}{\text{km}}$. Für 3,2 km Lei-

tungslänge ergibt das $3,2 \text{ km} \cdot 0,22 \frac{\text{Np}}{\text{km}} = 0,704 \text{ Np}$. Da der Wert größer als 0,65 Np, aber kleiner als 0,95 Np ist, muß gemäß Tabelle 2 eine Hörkapsel der Gruppe III (grün) und eine Sprechkapsel der Gruppe II (grün) eingesetzt werden.

Mikrofon und Fernhörer stellen im Fernsprechverkehr „Sender“ und „Empfänger“ dar. Sie sind neben dem Übertragungsweg die wichtigsten Elemente einer Fernsprechverbindung.

5.8. Wiederholungsfragen zum Abschnitt 5.7.

1. Welche grundsätzliche Aufgabe erfüllt das Mikrofon in der Elektroakustik?
2. Wie ist ein Kondensatormikrofon aufgebaut? 3. Erläutern Sie kurz die Wirkungsweise eines Kondensatormikrofons! 4. Welche wesentlichen Eigenschaften, Vor- und Nachteile hat ein Kondensatormikrofon? 5. Erläutern Sie Aufbau und Wirkungsweise des Bändchen- und des Tauchspulenmikrofons! 6. Nach welchem physikalischen Prinzip arbeitet ein Kristallmikrofon? 7. Warum werden Kristallmikrofone trotz hoher Empfindlichkeit selten verwendet? 8. Erläutern Sie die Funktion eines magnetischen Mikrofons! 9. Skizzieren Sie den Aufbau eines Kohlemikrofons und erläutern Sie die Wirkungsweise! 10. Warum darf man das Kohlemikrofon nicht als Energiewandler bezeichnen? 11. Aus welchen Gründen wird bis heute noch in der Fernsprechtechnik das Kohlemikrofon angewendet, obgleich andere Mikrofonarten zum Teil erheblich bessere Klangqualitäten aufweisen? 12. Welche Konstruktionsunterschiede weist ein modernes Kohlemikrofon gegenüber älteren Typen auf? Welche Vorteile ergeben sich daraus? 13. Warum ist praktisch erst heute der Einsatz besserer Mikrofonarten in der Fernsprechtechnik wirtschaftlich vertretbar? 14. Was bedeuten die Kapselgruppen I bis III für Sprechkapseln? 15. Erläutern Sie anhand einer Skizze den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise einer magnetischen Hörkapsel! 16. Welche Aufgabe hat der Dauermagnet in einer Hörkapsel? 17. Durch welche Merkmale unterscheiden sich moderne magnetische Hörkapseln (Ringmagnet- bzw. Ringankerhörer) vom magnetischen Hörer älterer Bauart? 18. Welche Aufgabe erfüllt ein sog. Dämpfungskörper in einer modernen Hörkapsel? 19. Erläutern Sie Aufbau und Wirkungsweise einer dynamischen Hörkapsel anhand einer Skizze! 20. Was bedeutet der Aufdruck II, III bzw. IV auf einer Hörkapsel? 21. Zu welchem Zweck teilt man Sprech- und Hörkapseln in Gruppen ein? 22. Nach welchen Grundsätzen werden Sprech- und Hörkapseln der verschiedenen Gruppen beim FeAp 61 eingesetzt?

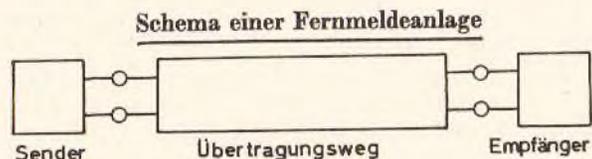
6. Die Leitungstechnik

6.1. Die Übertragung von Nachrichten

Fernmeldeanlagen dienen zur Übermittlung von Nachrichten. Bei den verschiedenen Nachrichtenarten können wir unterscheiden zwischen Nachrichten, die mit Hilfe von

Zeichen (Fernschreiben/Datenübertragung),
Tönen (Fernsprechen/Rundfunkübertragung) oder
Bildern (Bildtelegrafie/Fernsehübertragung)
erzeugt und wiedergegeben werden.

Jede Fernmeldeanlage besteht aus Sender, Übertragungsweg und Empfänger.



(Abb. 63)

Der Sender hat die Aufgabe, die Nachricht in diejenige Energieform umzusetzen, mit deren Hilfe die Nachrichtenübermittlung vor sich gehen soll. Dafür kommen heute im wesentlichen drei Energieformen in Betracht: Elektrische Energie, Lichtenergie und elektromagnetische Wellenenergie. Als Übertragungsweg kommen Leitungen oder auch der freie Raum in Frage. Wir wollen uns hier nur mit Leitungen als Übertragungsweg beschäftigen. Beim Empfänger müssen dann die Nachrichten in die ursprüngliche Form zurückverwandelt werden (vgl.: Sender = Mikrophon: Schall in elektrische Energie, Empfänger = Fernhörer: elektrische Energie wieder in Schall). Für unsere Betrachtungen interessiert nur die elektrische Energie.

Es leuchtet wohl ein, daß man mit reinem Gleichstrom keine Nachrichten übermitteln kann. Reiner Gleichstrom enthält ja keinerlei „Aussage“. Erst wenn man den Gleichstrom in Form von verabredeten Zeichen unterbricht oder entsprechende Gleichstromstöße auf eine Leitung gibt, kann die elektrische Energie eine Nachricht übermitteln. Wir können also sagen, daß der elektrische Strom nur Träger einer Nachricht ist. Er enthält erst eine Nachricht, wenn ihm diese in Form von **Änderungen** bestimmter Art „aufmoduliert“ worden ist (vgl.: Mikrophon im unbesprochenen Zustand: Es fließt ein Speisegleichstrom = keine Nachricht. Wird das Mikrophon besprochen, ändert sich die Stromstärke im Rhythmus der Tonfrequenz: Der Gleichstrom ist mit der Tonfrequenz moduliert worden).

Man kann daher von folgender Voraussetzung ausgehen:

Zur Nachrichtenübermittlung ist grundsätzlich die Modulation¹⁾ des Nachrichtenträgers durch die Nachricht erforderlich.

¹⁾ Beeinflussung

Vereinfacht können wir einen modulierten Strom als Wechselstrom betrachten.

Je nach Art der Nachricht werden verschiedene Anforderungen in bezug auf die Übertragungsgüte und den Frequenzbereich gestellt:

Nachrichtenart	allg. Anforderungen	erforderl. Frequenzbereich
Fernschreiben	Zeichentreue (Lesbarkeit)	0 60 Hz
Fernsprechen	Verständlichkeit	300 3 400 Hz
Rundfunkübertragung	Natürlichkeit	30 16 000 Hz
Fernsehübertragung	Bildschärfe (25 Bilder je Sekunde) (625-Zeilenbild)	0 5 MHz
Datenübertragung	Zeichentreue	(noch nicht festgelegt)

6.2. Fernmeldeleitungen und ihre Eigenschaften

Von der **Bauart** her unterscheidet man zwischen

Freileitungen = blanke Fernmeldeleitungen, die an oberirdischem Gestänge verlaufen und

Kabelleitungen = mit Isolation umhüllte Fernmeldeleitungen, die in meistens unterirdisch verlegten, seltener in freitragenden Kabeln verlaufen.

6.2.1. Der Wirkwiderstand

Der Wirkwiderstand einer Drahtleitung hängt nach der Formel

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

von dem **spezifischen Widerstand** des Leitermaterials, der **gesamten Leiterlänge** und dem **Querschnitt** des Leiters. Außerdem hat die **Temperatur** einen Einfluß auf den Leitungswiderstand. Der Temperatureinfluß kann – vor allem bei langen Fernmeldeleitungen und bei der Kabelfehlermeßtechnik – nicht unberücksichtigt bleiben. Daneben wirkt sich bei höheren Frequenzen auch noch eine auf die Wirkung der Induktion zurückzuführende Widerstandserhöhung aus. Diese Erscheinung wird als **Haut- oder Skineffekt** bezeichnet. Als Folge des Skineffekts fließen höher-

frequente Wechselströme praktisch nur noch in der Außenhaut des Leiters, während der Leiterkern stromlos ist (was einer Querschnittsverminderung gleichzusetzen ist).

6.2.2. Isolationswiderstand und Ableitung

Da selbst der beste Isolierstoff einen meßbaren, wenn auch sehr großen Widerstand besitzt, geht durch die Isolation elektrische Energie verloren (sie wird „abgeleitet“).

Der Isolationswiderstand stellt einen „Querwiderstand“ dar, der zwischen Hin- und Rückleitung liegt. Zum Beispiel soll der Isolationswiderstand

für Freileitungen (Doppelleitungen):

bei trockenem Wetter 1 M Ω · km,
bei feuchtem Wetter 0,5 M Ω · km,

für Kabeldoppeladern in:

Innenkabeln 100 M Ω · km,
Ortskabeln 5 000 M Ω · km,
Nahverkehrskabeln 5 000 M Ω · km und
Weitverkehrskabeln 10 000 M Ω · km betragen.

Aus praktischen Gründen wendet man in der Leitungstechnik den Kehrwert des Isolationswiderstandes an. Diesen Kehrwert bezeichnet man als Ableitung. Die entsprechende Maßeinheit ist Siemens bzw. Mikrosiemens. Bei Wechselstrom treten in der Isolation noch zusätzliche Wirkverluste auf, deren Ursache in der dielektrischen Verschiebung zu suchen ist. Hin- und Rückleitung bilden die Beläge eines Kondensators, dessen Dielektrikum durch die Leiterisolation dargestellt wird.

In den Werten für die Ableitung werden daher zusätzlich die dielektrischen Verluste des Isolationsmaterials berücksichtigt. Für das Fernsprechen wird eine Bezugsfrequenz von 800 Hz zugrunde gelegt.

6.2.3. Die Leitungsinduktivität

Da jede elektrische Verbindung aus Hin- und Rückleitung besteht, stellt sie eine Leiterschleife dar. Eine Leiterschleife besitzt eine Induktivität. Die Größe der Leitungsinduktivität hängt im wesentlichen von der Länge der Doppelleitung und von dem Abstand der beiden Leiter ab; je größer der Abstand, desto größer die Induktivität.

Bei Fernmeldeleitungen aus Eisendraht oder Kupferleitern, die mit Eisendraht umwickelt sind (Krärupkabel), hat die Permeabilität einen zusätzlichen Einfluß auf die Größe der Induktivität (vgl.: Eine Spule mit Eisenkern hat eine größere Induktivität als eine Spule mit Lufthohlraum).

6.2.4. Die Leitungskapazität

Die beiden parallellaufenden Drähte einer Doppelleitung bilden einen Kondensator. Seine Kapazität hängt außer von der Länge der Doppelleitung vom

Leiterdurchmesser (wirksame Plattenfläche),
Abstand der Leiter (Plattenabstand) und von der
Art des Dielektrikums (Dielektrizitätskonstante) ab.

Da die Leiter in einem Kabel enger aneinanderliegen, ergeben sich für Kabel-Doppelleitungen größere Kapazitäten als für Freileitungen, deren Leiterabstand ca. 20 cm beträgt. Als Dielektrikum kann in Kabeln nicht Luft mit der Dielektrizitätskonstanten 1 verwendet werden, da die Adern ja voneinander getrennt bleiben müssen.

Isoliermaterial aus Kunststoffen besitzt aber Dielektrizitätskonstanten etwa zwischen 3 und 5. Damit würde die Leitungskapazität in Kabeldoppeladern durch zwei Größen nachteilig beeinflusst, nämlich den geringen Abstand der Adern und die hohe Dielektrizitätskonstante der Leiterisolation. Das hätte große Verluste bei der Nachrichtenübertragung zur Folge; denn die Leitungskapazität stellt wie der Isolationswiderstand einen „Querwiderstand“ dar. Damit werden die Verluste um so größer, je größer die Leitungskapazität ist.

Um die Leitungskapazität einer Kabeldoppelleitung so gering wie möglich zu halten, wird in Kabeln meistens die sog. Papier-Luft-Isolierung angewendet.

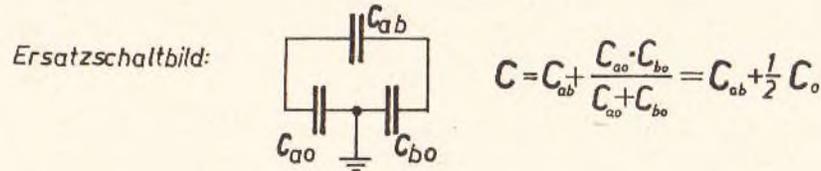
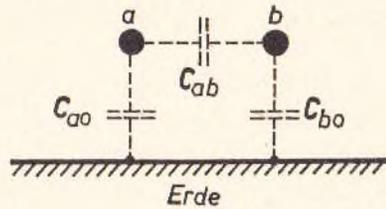
Dabei wird die Kupferader zunächst mit einer Papierkordel und darüber mit einem Papierband umwickelt. Damit ist ein großer Teil des Zwischenraums mit Luft ausgefüllt (niedrige Dielektrizitätskonstante). Aus der Kombination Luft-Papier ergibt sich für die Dielektrizitätskonstante ein Mittelwert von etwa 1,6.

Bei der Berechnung der sog. Betriebskapazität muß man berücksichtigen, daß die Leiter einer Doppelleitung neben der Kapazität zueinander auch noch eine Kapazität gegen Erde oder andere benachbarte Leiter (z. B. auch Kabelmantel) besitzen. Als einfaches Beispiel wählen wir eine Freileitung:

Jede Einzelleitung hat gegen Erde (C_0) und die Adern a und b gegeneinander eine Kapazität (C_{ab}). Die Betriebskapazität ergibt sich aus der Zusammenfassung

$$C_{ab} + \frac{C_0}{2}.$$

Beispiel für die Bestimmung der Betriebskapazität



(Abb. 64)

6.2.5. Die vier Leitungskennwerte

Die Werte für Wirkwiderstand, Ableitung, Induktivität und Kapazität einer Fernmeldeleitung werden auf 1 km Doppelleitung bezogen und als Leitungskennwerte bezeichnet.

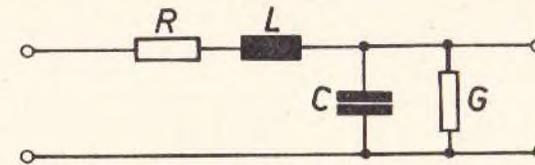
Um zu einfachen Zahlenangaben zu kommen, sind für die vier Leitungskennwerte folgende Maßeinheiten üblich:

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Widerstandskennwert	R'	$\frac{\Omega}{\text{km}}$
Ableitungskennwert	G'	$\frac{\mu\text{S}}{\text{km}}$
Induktivitätskennwert	L'	$\frac{\text{mH}}{\text{km}}$
Kapazitätskennwert	C'	$\frac{\text{nF}}{\text{km}}$

Angaben über die Leitungskennwerte verschiedener Leitungsarten können der Tabelle im Anhang entnommen werden.

Aus den vier Leitungskennwerten läßt sich folgendes Ersatzschaltbild zusammenstellen:

Ersatzschaltbild für den kurzen Abschnitt einer Fernmeldeleitung



(Abb. 65)

6.2.6. Der Wellenwiderstand

Wie aus dem Ersatzschaltbild für eine Fernmeldeleitung ersichtlich ist, muß man sich den Gesamtwiderstand einer Fernmeldeleitung aus zwei Wirkgrößen (Wirkwiderstand und Ableitung) und zwei Blindgrößen (Induktivität und Kapazität) zusammengesetzt denken. Dabei müssen wir davon ausgehen, daß sich jedes – auch noch so winzige – Teilstück einer Doppelleitung aus diesen vier Größen zusammensetzt.

Will man den Gesamtwiderstand einer längeren Fernmeldeleitung bestimmen, so ergibt er sich als Scheinwiderstand Z wie in einem zusammengesetzten Wechselstromkreis.

Hier haben wir es jedoch mit einer Schwierigkeit zu tun; denn wir übertragen in der Nachrichtentechnik normalerweise ein ganzes Frequenzband, d. h. ein Gemisch aus verschiedenen Frequenzen. Wir wissen aber, daß der induktive und der kapazitive Blindwiderstand frequenzabhängig sind. Daraus folgt: Der Scheinwiderstand einer Fernmeldeleitung ist für die verschiedenen Frequenzen eines Übertragungsbereichs verschieden. Um zu einem Richtwert als vergleichbare Größe verschiedener Fernmeldeleitungen zu kommen, bezieht man den Scheinwiderstand auf eine bestimmte Frequenz, die etwa in der Mitte des zu übertragenden Frequenzbereichs liegt und bezeichnet ihn als Wellenwiderstand. Dabei ist die Bedingung einzuhalten, daß die Leitung mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen ist (richtige Anpassung).

Vereinfacht können wir sagen:

Unter dem Wellenwiderstand einer Fernmeldeleitung versteht man ihren Scheinwiderstand bei einer Bezugsfrequenz.

Als Bezugsfrequenz dient z. B. beim Fernsprechen 800 Hz, bei der Rundfunkübertragung 1000 Hz, für Antennenleitungen für UKW-Rundfunk 100 MHz.

Man kann diesen Wellenwiderstand wie allgemein in der Wechselstromtechnik errechnen aus

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{\text{Wellenspannung}}{\text{Wellenstrom}}$$

bei der Bezugsfrequenz oder aus den vier Leitungskennwerten. **Der Wellenwiderstand ist unabhängig von der Leitungslänge!** Will man den

Wellenwiderstand einer Leitung aus den Leitungskennwerten berechnen, so gilt dafür folgende Grundformel:

$$Z = \sqrt{\frac{R + \omega L}{G + \omega C}}$$

In der Praxis vernachlässigt man jedoch die für den betreffenden Leitungstyp einflußlosen Anteile und kommt damit zu folgenden **Näherungsformeln**:

Für Freileitungen und
bespulte Kabelleitungen: $Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$,

für normale, unbespulte
Kabelleitungen: $Z = \sqrt{\frac{R'}{\omega C'}}$

In diese Formeln ist R in Ohm/km,
 L in Henry/km und
 C in Farad/km einzusetzen.

Man legt also im allgemeinen dafür die Werte der entsprechenden Leitungskennwerte zugrunde.

Beispiel:

Für eine Ortskabel-Doppelleitung mit 0,6 mm Aderndurchmesser ergeben sich nach der Tabelle (siehe Anhang) folgende Leitungskennwerte:

$$R' = 130 \frac{\Omega}{\text{km}}; C' = 31 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$$

Wie groß ist der Wellenwiderstand bei 800 Hz (Fernsprechen)?

Gegeben: $R' = 130 \frac{\Omega}{\text{km}}; C' = 31 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$

Gesucht: Z_{800}

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } Z_{800} &= \sqrt{\frac{R'}{\omega C'}} \\ &= \sqrt{\frac{130}{2 \cdot \pi \cdot 800 \cdot 0,000000031}} \\ &= \sqrt{838000} \\ Z_{800} &= \underline{915 \Omega} \end{aligned}$$

Die Ortskabel-Doppelleitung besitzt einen Wellenwiderstand von 915 Ohm.

6.3. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.1. und 6.2.

1. Aus welchen Teilen setzt sich eine Fernmeldeanlage zusammen? 2. Welche Aufgaben haben Sender und Empfänger einer Fernmeldeanlage? 3. Welche Energieformen werden heute vorwiegend für die Nachrichtentechnik verwendet? 4. Warum kann man mit reinem Gleichstrom keine Nachrichten übertragen? 5. Was versteht man in der Nachrichtentechnik unter Modulieren bzw. Modulation? 6. Nennen Sie die im Fernmeldenetz gebräuchlichen Nachrichtenarten, die Anforderungen, die an ihre Übertragung gestellt werden und die dazu erforderlichen Frequenzbereiche!

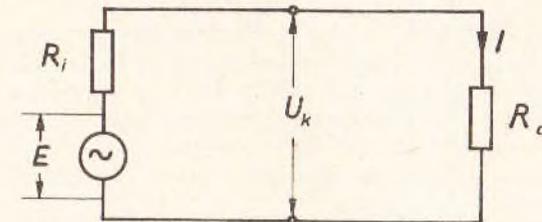
Von welchen Größen ist der Wirkwiderstand einer Fernmeldeleitung abhängig?

8. Was versteht man unter der Ableitung und wodurch wird sie hervorgerufen? 9. Von welchen Größen hängen Leitungsinduktivität und Betriebskapazität einer Doppelleitung ab? 10. Wie ergibt sich die Betriebskapazität für eine Doppelleitung? 11. Warum wendet man in Fernsprechkabeln die Papier-Luft-Isolation an? 12. Was versteht man unter den Leitungskennwerten? 13. In welchen Einheiten werden die Leitungskennwerte angegeben? 14. Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild für eine Fernmeldeleitung! 15. Was versteht man unter dem Wellenwiderstand einer Fernmeldeleitung? 16. Warum macht man einen Unterschied zwischen Wellenwiderstand und Scheinwiderstand?

6.4. Die Anpassung

Zur Erklärung des Begriffs Anpassung wollen wir zunächst eine Schaltung betrachten, die aus einer Stromquelle mit der Leerlaufspannung $E = 10 \text{ V}$, sowie dem inneren Widerstand $R_i = 600 \Omega$ und einem veränderbaren Belastungswiderstand R_a besteht.

Stromkreis zur Ableitung des Begriffs Anpassung



(Abb. 66)

Der Belastungswiderstand soll verschiedene, bestimmte Widerstandswerte erhalten. Für jeden Belastungsfall wird die Klemmenspannung U_k , der Strom I und die vom Belastungswiderstand R_a aufgenommene elektrische Leistung P_a berechnet.

Die Rechnung stellen wir in Tabellenform zusammen:

E	R_i	R_a	$R_a : R_i$	$I = \frac{E}{R_i + R_a}$	$U_k = I \cdot R_a$	$P_a = U_k \cdot I$
V	Ω	Ω		A	V	mW
10	600	0	0 : 1	0,0167	0	0
10	600	200	1 : 3	0,0125	2,5	31,2
10	600	400	2 : 3	0,01	4	40,0
10	600	600	1 : 1	0,00833	5	41,7
10	600	1200	2 : 1	0,00555	6,66	37,0
10	600	1800	3 : 1	0,00417	7,5	31,2
10	600	∞	$\infty : 1$	0	10	0

Daraus können wir folgern:

Die Leistungsabgabe einer elektrischen Energiequelle an einen Verbraucher ist dann am größten, wenn der Verbraucherwiderstand genauso groß ist wie der innere Widerstand der Energiequelle.

Diesen Sonderfall in einem elektrischen Stromkreis bezeichnet man als **Anpassung**.

Auf eine Formel gebracht können wir schreiben:

$$\text{Anpassung: } R_a = R_t$$

Da wir bei der Nachrichtenübertragung mit Wechselströmen arbeiten, müssen wir auch die Wechselstromwiderstände der Fernmeldeanlage berücksichtigen. Somit gilt für die Fernmeldetechnik:

$$\text{Anpassung: } Z_a = Z_t$$

In der Fernmeldetechnik wird zur Nachrichtenübertragung nur sehr geringe elektrische Energie aufgewendet (vgl.: Ein Fernhörer benötigt zur guten Ansteuerung nur 0,1 mW!). Diese geringe Energie muß so verlustlos wie möglich vom Sender zum Empfänger übertragen werden. Darum muß in der Fernmeldetechnik grundsätzlich „angepaßt“ werden. Die Anpassung ist beim Zusammenschalten aller Teile einer Fernmeldeanlage zu beachten:

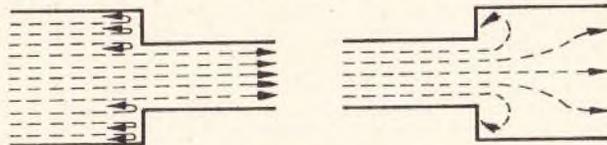
Sender – Übertragungsweg, Übertragungsweg – Empfänger.

Innerhalb eines Übertragungswegs (Fernmeldeleitung) kann es zu Schwierigkeiten kommen, wenn zwei verschiedenartige Leitungen miteinander verbunden werden müssen, oder wenn der Sender einen anderen Wellenwiderstand aufweist als der Empfänger.

Beim einfachen Zusammenschalten würden sich hier sog. Fehlanpassungen ergeben und die Energie würde nicht in optimaler Höhe weitergegeben.

An Stellen mit Fehlanpassung treten unnötige Energieverluste (Dämpfung) auf.

Man kann sich diese Energieverluste am Beispiel des Wassergrabens erklären:



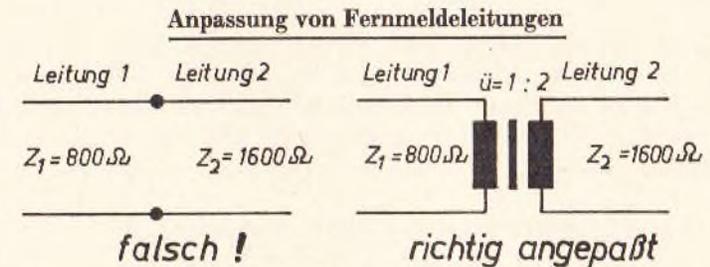
(Abb. 67)

Ein Wassergraben von gleichmäßiger Breite leitet einen durchfließenden Wasserstrom ohne bemerkenswerte Widerstände ab. Wird aber der Graben plötzlich breiter oder schmaler, so bilden sich an dieser Stelle Wasserwirbel oder Stauungen, die den gleichmäßigen Wasserablauf hemmen.

Die Wasserstauung kann man als Reflexion bezeichnen, weil ein Teil des Wassers dem Hauptwasserstrom entgegenfließt.

In der Fernmeldetechnik wird eine Fehlanpassung auch als **Stoßstelle** bezeichnet.

Zur Beseitigung dieser Stoßstellen muß man einen geeigneten Übergang schaffen. Das kann durch **Anpassungsübertrager** erreicht werden. Die Anpassungsübertrager werden so in die Fernmeldeverbindung geschaltet, daß z. B. der Wellenwiderstand der ankommenden Leitung mit dem Primärwellenwiderstand des Übertragers übereinstimmt. Auf diese Weise wird durch den Übertrager wieder das richtige Verhältnis von Spannung zu Strom hergestellt.



(Abb. 68)

6.5. Die Dämpfung

6.5.1. Die Leitungsdämpfung

Beim Transport elektrischer Energie treten Energieverluste auf. Diese Energieverluste werden in der Starkstromtechnik im Wirkungsgrad berücksichtigt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{\frac{U_2^2}{R_2}}{\frac{U_1^2}{R_1}}$$

In der Fernmeldetechnik werden die Energieverluste als **Dämpfung** bezeichnet. Aus Gründen, die wir noch untersuchen werden, kann man die

Energieverluste in einer Fernmeldeverbindung nicht durch den Wirkungsgrad ausdrücken. Man kann jedoch eine Vereinfachung machen:

Da in der Fernmeldetechnik grundsätzlich angepaßt wird, R_t bzw. Z_t also gleich R_a bzw. Z_a ist, genügt es, die Spannung am Ausgang (z. B. Leitungsende) mit der Spannung am Eingang (z. B. Leitungsanfang) zu vergleichen. In der obigen Wirkungsgradformel kann nämlich R gekürzt werden, wenn $R_1 = R_2$!

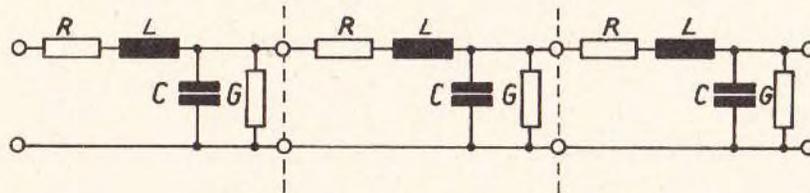
Daher gilt:

Den Spannungsverlust auf einer Fernmeldeverbindung bezeichnet man als Dämpfung.

Die Spannung nimmt im Zuge einer Fernmeldeverbindung jedoch nicht gleichmäßig ab. Daher kann hier nicht mit der Wirkungsgradformel gearbeitet werden.

Bei den Grundeigenschaften einer Fernmeldeleitung haben wir bereits festgestellt, daß sich jedes kleinste Teilstück einer Doppelleitung aus den Größen R , L , G und C zusammensetzt. Man muß sich daher das Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung aus vielen Ersatzschaltungen aneinandergereiht denken.

Ersatzschaltbild einer längeren Fernmeldeleitung



(Abb. 69)

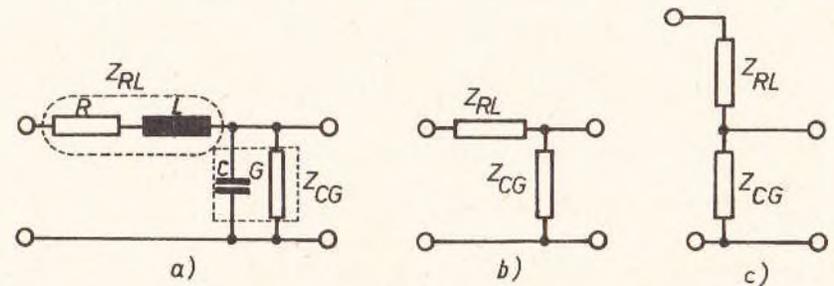
Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Kettengliedschaltung. Von diesem Schaltbild müssen wir bei der Ableitung des Begriffs Dämpfung ausgehen.

Da dem Dämpfungsbegriff ebenso wie dem Lautstärkebegriff der mathematische Begriff Logarithmus zugrunde liegt, soll hier versucht werden, die Zusammenhänge ohne Kenntnis des Begriffs Logarithmus zu erklären:

Bei unserer Ableitung können wir von folgenden Voraussetzungen ausgehen:

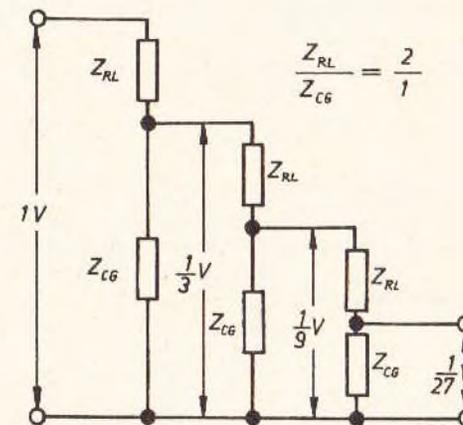
- a) Wegen der Frequenzabhängigkeit der Widerstände X_L und X_C wählen wir eine feste Bezugsfrequenz von 800 Hz (Fernsprechen). Für diese Bezugsfrequenz ergeben sich ganz bestimmte Widerstandswerte X_L und X_C .

- b) Sowohl die Widerstände, die in Reihe im Leitungszug liegen (R und X_L), als auch die Widerstände, die zwischen den Einzelleitern liegen (G und X_C), werden je zu einem Gesamtwiderstand Z_{RL} und Z_{CG} zusammengefaßt (Abb. 70a).
- c) Damit können wir ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen kleinen Abschnitt der Fernmeldeleitung aus den beiden Scheinwiderständen Z_{RL} und Z_{CG} darstellen (Abb. 70b).



(Abb. 70)

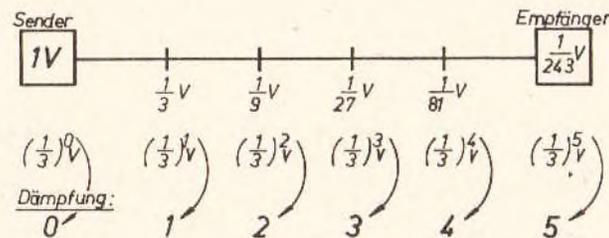
- d) Wenn wir jetzt dieses vereinfachte Schaltbild wie in Abb. 70c darstellen, erhalten wir eine einfache Spannungsteilerschaltung (Potentiometer).
- e) Für eine Fernmeldeleitung ergibt sich damit eine Kettenschaltung aus Spannungsteilern (Abb. 71).
- f) Zur Vereinfachung nehmen wir zunächst an, daß sich die Widerstände Z_{RL} zu Z_{CG} wie 2 zu 1 verhalten.
- g) An den Eingang wird eine Spannung von 1 Volt gelegt.



(Abb. 71)

Aus der Schaltung ergibt sich: Am Ausgang des ersten Spannungsteilers liegt noch $\frac{1}{3}$ V. Diese $\frac{1}{3}$ V werden im folgenden Spannungsteiler wiederum auf $\frac{1}{3}$ von $\frac{1}{3}$ V = $\frac{1}{9}$ V herabgesetzt und im darauffolgenden auf $\frac{1}{3}$ von $\frac{1}{9}$ V = $\frac{1}{27}$ V usw.

Die Spannung nimmt also im Verlauf der Leitung nach folgendem Schema ab:



(Abb. 72)

Da die Spannungsverminderung jeweils im gleichen Verhältnis vor sich geht, kann man sie auch durch eine Potenzreihe ausdrücken, in der immer die gleiche Basis (z.B. $\frac{1}{3}$) steht. Der Exponent (Hochzahl) dieser Potenzreihe gilt in der Fernmelde-technik als Maß für die Dämpfung.

In der Mathematik nennt man das Bestimmen eines Exponenten zu einer bestimmten Basis (z.B. 10) und einem gegebenen Potenzwert (z.B. 100) Logarithmieren. (Logarithmus $100 = 2$; denn $10^2 = 100$.) Das Dämpfungsmaß ist also ein Logarithmus.

Man kennt in der Mathematik verschiedene Logarithmensysteme mit verschiedener Basis. In der Fernmeldetechnik legt man die Basis $\frac{1}{10}$ oder die Basis $\frac{1}{2,718}$ zugrunde. Wir brauchen nur noch eine kleine Korrektur unserer obigen Potenzreihe vorzunehmen. Wenn wir anstelle $\frac{1}{3}$ nun $\frac{1}{2,718}$ setzen, dann gibt der jeweilige Exponent die Gesamtdämpfung zwischen Sender und der betr. Stelle in Neper an.

2,718 ist die Zahl „e“ und Basis der sog. natürlichen Logarithmen. Sie wurden vom englischen Mathematiker John Napier entwickelt. Aus dem Namen abgeleitet ist die Maßeinheit Neper.

Die Dämpfung kann nach folgender Formel anhand der Spannungen berechnet werden:

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2} N_p$$

(\ln = natürlicher Logarithmus).

Ähnlich wie zur Berechnung des Wellenwiderstands gibt es auch Näherungsformeln zur Berechnung der Leitungsdämpfung aus den Leitungskennwerten:

$$\text{Freileitung bzw. bespulte Kabel-DA: } \alpha' = \frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L}}$$

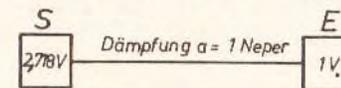
$$\text{unbespulte Kabel-DA: } \alpha' = \sqrt{\frac{R' \cdot \omega C'}{2}}$$

Werden für R' , L und C' die Werte für 1 km Doppelleitung eingesetzt, so ergibt sich α' in $\frac{N_p}{\text{km}}$ (Dämpfungskennwert).

Das Dämpfungsmaß wird mit dem Buchstaben a gekennzeichnet.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Dämpfungsmaß	a	N_p (Neper)

Das Dämpfungsmaß 1 Neper



(Abb. 73)

Aus den bisherigen Erkenntnissen können wir zusammenfassen:

Eine Leitung hat die Dämpfung 1 Neper, wenn die Spannung am Ende auf $\frac{1}{2,718}$ der Eingangsspannung abgesunken ist.

Sinngemäß gilt z. B.: Eine Leitung hat die Dämpfung 3 Neper, wenn die Spannung am Ende auf $(\frac{1}{2,718})^3$, also auf $\frac{1}{20,1}$, abgesunken ist.

Die Dämpfung ist im allgemeinen frequenzabhängig.

Seit Herbst 1969 wird auch bei der Deutschen Bundespost zur Anpassung an den internationalen Fernmeldeverkehr die Dämpfung in Dezibel (dB) gemessen. Dieser Maßeinheit liegen die sog. Briggschen Logarithmen (Basis 10) zugrunde.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Dämpfungsmaß	a	dB (Dezibel)

Die Dämpfung in dB kann nach folgenden Formeln errechnet werden:

$$\text{Spannungsdämpfung: } a = 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ in dB,}$$

$$\text{Leistungsdämpfung: } a = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ in dB.}$$

Darin bedeuten:

U_2 = Spannung am Ausgang (Leitungsende),

U_1 = Spannung am Eingang (Leitungsanfang),

P_2 = Leistung am Ausgang (Leitungsende),

P_1 = Leistung am Eingang (Leitungsanfang).

Als Richtwert kann angegeben werden:

Eine Leitung hat die Dämpfung 6 dB, wenn die Spannung am Ende auf $\frac{1}{2}$ der Eingangsspannung abgesunken ist.

Sinngemäß gilt 12 dB: $\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{1}{4}$ oder 18 dB: $\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{1}{8}$

Die beiden Maßeinheiten Neper und Dezibel lassen sich nach folgender Regel ineinander umrechnen:

$$\begin{aligned} 1 \text{ N} &= 8,686 \text{ dB} \\ 1 \text{ dB} &= 0,1151 \text{ N}_p \end{aligned}$$

Ebenso wie die vier Grundkonstanten einer Fernmeldeleitung wird ihre Dämpfung auf 1 km Doppelleitung berechnet und als Dämpfungskennwert bezeichnet.

Begriff	Formelzeichen	Einheit
Dämpfungskennwert	a'	$\frac{\text{N}_p}{\text{km}}$

Anhand des Dämpfungskennwerts kann man leicht die Gesamtdämpfung einer bestimmten Leitung errechnen:

$$a = a' \cdot l$$

In dieser Formel ergibt sich a in Neper, wenn a' in $\frac{\text{N}_p}{\text{km}}$ und l in km eingesetzt wird.

Der Vorteil der logarithmischen Dämpfungsberechnung besteht darin, daß man die Gesamtdämpfung eines zusammengesetzten Übertragungsweges (z. B. mehrerer Leitungsabschnitte) durch einfache Addition der einzelnen Dämpfungen bestimmen kann.

Als Formel gilt:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + \dots$$

Beispiel:

Wie groß ist die Dämpfung einer 80 km langen Fernleitung, wenn der Dämpfungskennwert $75 \frac{\text{mN}_p}{\text{km}}$ beträgt?

Gegeben: $l = 80 \text{ km}; a' = 75 \frac{\text{mN}_p}{\text{km}}$

Gesucht: a

$$\begin{aligned} \text{Lösung: } a &= a' \cdot l \\ &= 0,075 \frac{\text{N}_p}{\text{km}} \cdot 80 \text{ km} \\ a &= \underline{\underline{6 \text{ N}_p}} \end{aligned}$$

Die Fernleitung hat eine Dämpfung von 6 Neper.

Untersuchungen an Fernsprechleitungen in bezug auf die Güte der Verständigung (Verständlichkeit) führten zu folgendem Ergebnis:

Bei einer Dämpfung von	wird die Verständlichkeit als
1 N_p	sehr gut
2 N_p	gut
3 N_p	genügend
4 N_p	mangelhaft
5 N_p	ungenügend

empfunden.

Anhand dieser Ergebnisse wurde für das Fernsprechnet der DBP eine **Höchstgrenze für die Dämpfung zwischen zwei Sprechstellen (Hauptanschlüssen) von 3,65 Neper festgesetzt (Dämpfungsplan 55).**

6.5.2. Die Bezugsdämpfung

Die Übertragungsgüte einer Fernsprechverbindung ist nicht nur von der Leitungsdämpfung, sondern z. B. auch von den Eigenschaften der im Fernsprechapparat eingesetzten Sprech- und Hörkapseln abhängig (Kapselgruppen!). Man vergleicht daher die Übertragungseigenschaften einer Fernsprechverbindung mit einem international festgelegten Eichkreis und bezeichnet die auf diese Weise ermittelte Dämpfung als Bezugsdämpfung.

Wird in einer Fernsprechverbindung auf der Sendeseite ein Mikrofon geringer Empfindlichkeit eingesetzt, so ist die Sendeenergie hier kleiner als beim Eichkreis. Man sagt: Die **Sendebzugsdämpfung** ist größer (z. B. $+0,8 \text{ N}_p$). Ein Mikrofon hoher Empfindlichkeit setzt die Sendebzugsdämpfung gegenüber dem Eichkreis herab (z. B. $-0,2 \text{ N}_p$). Die Sendebzugsdämpfung hängt auch von der Höhe der Mikrofonspannung ab. Auf der Empfangsseite wird die Empfindlichkeit der Hörkapseln berücksichtigt: Eine Hörkapsel geringer Empfindlichkeit setzt die sog. **Empfangsbzugsdämpfung** im Vergleich zum Eichkreis nur geringfügig herab (z. B. $-0,2 \text{ N}_p$), eine Hörkapsel hoher Empfindlichkeit dagegen stark (z. B. -1 N_p).

Wir folgern:

Bei der Berechnung der Gesamtdämpfung einer Fernsprechverbindung muß auch die Sendebzugsdämpfung und die Empfangsbzugsdämpfung berücksichtigt werden.

Für die verschiedenen Gruppen der Sprech- und Hörkapseln sind bestimmte Grenzen für die Bezugsdämpfung festgelegt worden:

Sprechkapsel-Gr.	Sendebezugsdämpfung
I	+ 0,9 ... + 0,5 N _p
II	+ 0,5 ... + 0,1 N _p
III	+ 0,1 ... - 0,3 N _p
Hörkapsel-Gr.	Empfangsbezugsdämpfung
I	0 ... - 0,3 N _p
II	- 0,3 ... - 0,6 N _p
III	- 0,6 ... - 0,9 N _p
IV	- 0,9 ... - 1,2 N _p

Um die Gesamtdämpfung einer Fernsprechverbindung zu bestimmen, muß man zur Leitungsdämpfung die Sende- und Empfangsbezugsdämpfung sowie die **Dämpfung der technischen Einrichtungen** addieren. Dabei gelten etwa folgende Richtwerte:

Orts-VStW ca. 0,15 N_p,

Fern-VStW (KVSt, HVSt, ZVSt) ca. 0,1 N_p.

6.6. Maßnahmen zur Herabsetzung der Leitungsdämpfung

Um die Verluste an elektrischer Energie (Dämpfung) auf einer Fernmeldeleitung herabzusetzen, muß man diejenigen Größen einer Leitung beeinflussen, die die Dämpfung verursachen. Das sind die vier Grundgrößen R , L , C und G . Den größten Einfluß auf die Leitungsdämpfung haben der Leitungswiderstand R und die Kapazität C . Darum liegt es nahe,

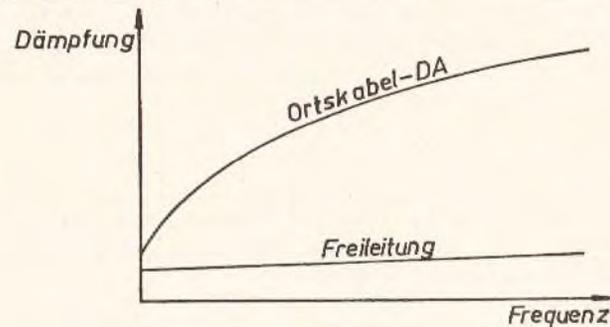
a) den Leitungswiderstand R und

b) die Leitungskapazität C zu verringern,

um die Dämpfung herabzusetzen. Diese Voraussetzung ist durch die Bauweise einer Freileitung bereits gegeben, nämlich durch den größeren Leiterquerschnitt und den größeren Abstand der Einzelleitungen voneinander.

Zum Vergleich zwischen einer Kabelleitung und einer Freileitung dient uns folgendes Diagramm:

Dämpfungsverlauf in einer Kabel- und einer Freileitung



(Abb. 74)

Es zeigt die Abhängigkeit der Dämpfung von der Frequenz für eine Kabeldoppelader und eine Freileitung. Dabei ergibt sich, daß die Leitungsdämpfung der Freileitung nicht nur geringer als die der Kabeldoppelader ist, sondern daß sie kaum von der Frequenz abhängt. Um die Dämpfung in Kabeldoppeladern herabzusetzen, kann man wohl den Leiterquerschnitt vergrößern (Fernkabel), nicht aber den Abstand der Einzeladern zueinander; denn durch die Vergrößerung des Leiterabstandes würde die Festigkeit des Kabels (Papier-Luft-Isolation!) und der Kabeldurchmesser ungünstig beeinflusst. Es gibt daher nur noch die Möglichkeit, den **Einfluß der Kapazität zu vermindern**.

Wir haben im Teil I dieses Handbuchs bereits kennengelernt, daß Induktivität und Kapazität eine entgegengesetzte (180°) Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom verursachen bzw. daß sich induktiver und kapazitiver Blindwiderstand bei gleicher Größe gegeneinander aufheben (Resonanz).

Diese Tatsache macht man sich zunutze, indem man die **Induktivität in Kabelleitungen künstlich erhöht, um die nachteilige Auswirkung der Leitungskapazität zu verringern**.

Die Erhöhung der Leitungsinduktivität kann auf zwei Arten erfolgen:

a) Durch Bewicklung der Kupferadern mit einem dünnen Eisendraht (Vergrößerung der Permeabilität) nach dem Patent des dänischen Ingenieurs **Krarup** (Krarupverfahren).

Dieses Verfahren ist heute nicht mehr gebräuchlich, da es zu kostspielig ist. Es hatte aber große Bedeutung vor allem für Seekabel, da man früher die Technik der Bepulung nicht so vollkommen beherrschte. Das Krarupverfahren hat jedoch gegenüber dem Pupinverfahren den Vorteil, daß sich die Erhöhung der Leitungsinduktivität völlig gleichmäßig auf die Leitungslänge auswirkt (keine ausgeprägte Grenzfrequenz).

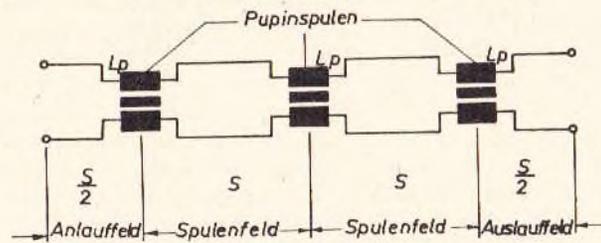
b) Durch punktweises Einschalten von Induktivitäten (Spulen) in den Leitungszug nach dem Vorschlag von Michael **Pupin**. Nach ihm wird diese Maßnahme heute als **Pupinverfahren** benannt. Man spricht auch von der Pupinisierung eines Kabels.

Um die Symmetrie der Leitung zu erhalten, werden die Pupinspulen je zur Hälfte in die a- und b-Ader geschaltet (siehe Abb. 75).

Den Streckenabschnitt zwischen zwei Spulen bezeichnet man als **Spulenfeld** mit dem Buchstaben s . Der Abschnitt vom Anfang bis zur ersten Spule wird als **Anlauf-feld**, der Abschnitt von der letzten Spule bis zum Leitungsende als **Auslauf-feld** bezeichnet. Damit sich die Spulen beim Hintereinanderschalten mehrerer pupinierter Kabel (Fernverkehr) gleichmäßig auf die Gesamtstrecke verteilen, werden Anlauf- und Auslauf-feld halb so lang gemacht wie ein Spulenfeld, also $\frac{s}{2}$.

Durch das Einschalten von Induktivitäten (Spulen) in eine Kabelleitung kann die Wirkung der Leitungskapazität und damit die Dämpfung herabgesetzt werden.

Bespulungsschema für eine Kabelstrecke



(Abb. 75)

Das punktförmige Einschalten von Induktivitäten in die Leitung bringt aber auch Schwierigkeiten mit sich; denn Induktivität und Leitungskapazität bilden einen Resonanzkreis (Sperrkreis), der von einer bestimmten Resonanzfrequenz ab den Durchgang für Wechselströme sperrt. Vergrößert man die Induktivität zu stark (große Induktivität in großen Abständen), so wird die Resonanzfrequenz unter Umständen so weit herabgesetzt, daß das Übertragungsfrequenzband beschnitten wird, die oberen Frequenzen also nicht zum Empfänger gelangen.

Man bezeichnet die obere Grenze für den Übertragungsbereich einer bespulten Leitung als **Grenzfrequenz** f_0 .

Wir können also folgern:

Der mögliche Übertragungsbereich für eine bespulte Leitung wird für hohe Frequenzen um so geringer, je größer die Spuleninduktivität ist.

Die Grenzfrequenz kann nach der Formel

$$f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 \cdot C_0}}$$

bestimmt werden.

In dieser Formel bedeuten:

L_0 = Induktivität eines Spulenfeldes in H
(Leitungsinduktivität für 1,7 km + Spuleninduktivität),

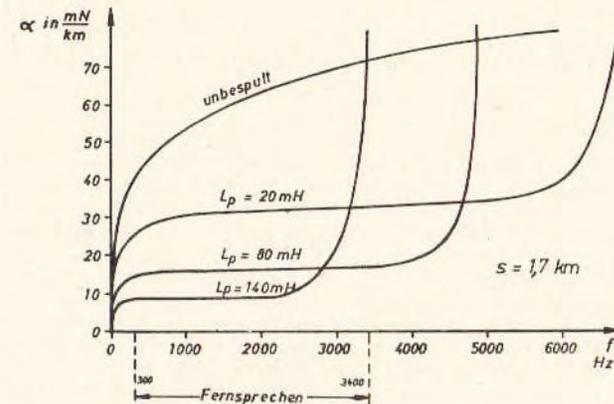
C_0 = Kapazität eines Spulenfeldes in F
(Leitungskapazität für 1,7 km).

Um die Grenzfrequenz hoch genug zu halten, setzt man kleinere Induktivitäten in kürzeren Abständen in die Leitung ein.

Die Länge eines Spulenfeldes beträgt heute allgemein 1,7 km.

Aus dem folgenden Diagramm ist die Abhängigkeit der Dämpfung und der Grenzfrequenz von der Bespulation ersichtlich.

Einfluß der Bespulation auf Dämpfung und Grenzfrequenz



(Abb. 76)

Wir erkennen:

- Die Dämpfung wird um so geringer, je größer die Induktivität der Pupinspulen gemacht wird.
- Innerhalb eines bestimmten Bereichs ist die Dämpfung für alle Übertragungsfrequenzen nahezu gleich.
- Von einer bestimmten Frequenz an steigt die Dämpfung sehr stark an, so daß oberhalb dieser Frequenz praktisch nichts mehr übertragen wird (Grenzfrequenz).
- Der Übertragungsbereich wird um so stärker eingengt, je größer die Spuleninduktivität gemacht wird.

Die Wirkungsweise einer Induktivität kann man mit dem Begriff der Massenträgheit aus der Mechanik in Zusammenhang bringen. In der Bespulationstechnik spricht man daher auch vom Belasten eines Kabels bzw. von einem

sehr leicht bespulten (z. B. 3,2 mH je Spulenfeld),
leicht bespulten (z. B. 20 mH je Spulenfeld),
mittelschwer bespulten (z. B. 80 mH je Spulenfeld) oder
schwer bespulten Kabel (z. B. 200 mH je Spulenfeld).

Die Pupinspulen werden heute ausschließlich als Lackdrahtspulen mit Ferrit- bzw. Masseisenkern hergestellt. Alle Spulen, die an einer Stelle

(Spulenkasten) in ein Kabel eingeschaltet werden sollen, werden in einen Spulenkasten eingebaut. Der Spulenkasten enthält also eine jeweils der Doppeladernzahl entsprechende Zahl an Spulen. Die Spulen werden mit einer Vergußmasse gegen Feuchtigkeit geschützt.

6.7. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.4. bis 6.6.

1. Warum ist in der Fernmeldetechnik die Anpassung so wichtig? 2. Was versteht man unter Anpassung bzw. was wird durch richtige Anpassung erreicht? 3. Wie wirkt sich eine Fehlanpassung aus? 4. Wie wird beim Zusammenschalten z. B. zweier Fernmeldeleitungen mit verschiedenem Wellenwiderstand eine Anpassung erzielt? 5. Was versteht man allgemein unter dem Begriff Dämpfung? 6. Warum kann man sich bei der Bestimmung oder Messung der Dämpfung auf die Spannungen beschränken? 7. Wodurch wird die Dämpfung überhaupt verursacht? 8. Warum ist die Dämpfung frequenzabhängig? 9. Unter welchen Voraussetzungen hat eine Fernmeldeleitung die Dämpfung 1 Neper bzw. 4 Neper? 10. Wie lassen sich die verschiedenen Maßeinheiten Neper und Dezibel ineinander umrechnen? 11. Wie bestimmt man die Gesamtdämpfung einer Leitung, wenn die Dämpfungskonstante bekannt ist? 12. Wie groß darf nach dem Dämpfungsplan 55 die Gesamtdämpfung zwischen zwei Hauptanschlüssen sein? 13. Erläutern Sie die Begriffe Bezugsdämpfung, Sendebezugsdämpfung und Empfangsbezugsdämpfung! 14. Durch welche Maßnahmen könnte man grundsätzlich die Leitungsdämpfung herabsetzen? 15. Aus welchen Gründen kann man praktisch die Leitungskapazität in Kabeln nicht verringern? 16. Was unternimmt man, um den schädlichen Einfluß der Leitungskapazität zu verringern? 17. Erläutern Sie den Einfluß der Pupinspulen auf die Dämpfung! 18. Warum kann man die Induktivität der Pupinspulen nicht beliebig vergrößern und warum müssen sie in kürzeren Abständen in die Leitung geschaltet werden? 19. Skizzieren Sie ein Bepulungsschema für eine Kabelleitung! 20. Warum werden Anlauf- und Auslauffeld nur halb so lang wie ein Spulenfeld gemacht? 21. Wie lang ist heute ein Spulenfeld? 22. Welchen Einfluß hat die Größe der Spuleninduktivität (Pupinspulen) auf die Dämpfung und die Grenzfrequenz einer Kabelleitung?

6.8. Übertragungsstörungen auf Fernmeldeleitungen

Die Nachrichtenübertragung auf Fernmeldeleitungen wird nicht nur durch die Energieverluste (Dämpfung) schlechthin, sondern auch durch andere Einflüsse verschlechtert, die sich z. T. aus den Eigenschaften einer Leitung ergeben.

6.8.1. Dämpfungsverzerrungen

Dämpfungsverzerrungen entstehen auf längeren Leitungen dadurch, daß die verschiedenen hohen Frequenzen bei einer Übertragung verschieden stark gedämpft werden. Besonders bei Kabeln, die eine große Kapazität haben, werden die höheren Frequenzen stärker gedämpft als die tieferen. Dadurch ändert sich die Klangfarbe einer Übertragung eventuell bis zur Unverständlichkeit. Die Größe einer Dämpfungsverzerrung wird beurteilt, indem man die Dämpfung der höchsten und der

tiefsten Frequenz eines Übertragungsbereiches auf die mittlere Frequenz – z. B. 800 Hz – bezieht. Dämpfungsverzerrungen kann man durch sogenannte Leitungsentzerrer ausgleichen.

Dämpfungsverzerrungen entstehen durch verschieden starke Dämpfung von hohen und tiefen Frequenzen eines Frequenzbandes auf einem Übertragungsweg.

6.8.2. Nichtlineare Verzerrungen (Klirrvverzerrungen)

Bei der Übertragung von Nachrichten können auf dem Übertragungsweg zusätzliche – in der ursprünglichen Nachricht nicht enthaltene – Schwingungen erzeugt werden. Diese als Oberschwingungen bezeichneten Wechselströme beeinträchtigen z. B. das Klangbild bei der Übertragung von Musik und Sprache, die Wiedergabe klingt „rauh“ oder wie ein Klirren. Darum nennt man diese Verzerrungen auch Klirrvverzerrungen. Zur Beurteilung eines Übertragungsweges hinsichtlich der Klirrvverzerrungen gibt man seinen sogenannten **Klirrfaktor in Prozent** an. Er sagt aus, wie groß der Anteil in Prozent an zusätzlichen, unerwünschten Oberschwingungen an der ursprünglichen Nachricht ist. **Klirrvverzerrungen werden durch Bauteile mit sogenannter gekrümmter Kennlinie** (nichtlinearer Kennlinie) verursacht. Solche Bauteile sind z. B. Spulen oder Übertrager mit Eisenkernen (Hysteresis), Verstärkerrohren, Transistoren und Gleichrichterdioden. Wegen der Entstehung in Bauteilen mit nichtlinearer Kennlinie bezeichnet man die Verzerrungen auch als nichtlineare Verzerrungen.

Aufgetretene nichtlineare Verzerrungen lassen sich nicht mehr beseitigen. Man muß ihre Entstehung durch geeignete Maßnahmen (z. B. sogenannte Gegenkopplungen oder geringe Aussteuerung) verhindern.

Nichtlineare Verzerrungen entstehen in Bauteilen mit gekrümmter Kennlinie und werden durch die Erzeugung unerwünschter zusätzlicher Oberwellen hervorgerufen.

6.8.3. Die Laufzeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Nachrichtenwechselströmen beträgt – vor allem für längere, bespulte Leitungen – nicht mehr 300 000 km/s, sondern liegt zum Teil erheblich darunter. Für eine mittelschwer bespulte Kabeldoppelleitung ergibt sich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 10 000 bis 30 000 km/s. Sie würde bei der Übermittlung von Fernschreiben oder Rundfunkdarbietungen nicht stören. Beim Fernsprechen kann aber eine große Laufzeit der Nachricht den Betrieb erheblich beeinträchtigen.

Nehmen wir eine Kabelleitung von Deutschland nach Australien an. Ihre Länge würde etwa 20 000 km (halber Erdumfang) betragen. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 10 000 km/s wäre eine fernmündliche Frage 2 s unterwegs, um zum Empfänger zu gelangen. Bis die Antwort zurückkäme, wären mindestens weitere 2 s vergangen. Zwischen Frage und Antwort wären also schon insgesamt 4 s verstrichen. Der Anrufer würde u. U. annehmen, die Verbindung sei nicht zustande gekommen und den Hörer wieder auflegen.

Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß Laufzeiten von $\frac{1}{4}$ s den Fernsprechbetrieb nicht stören.

Laufzeit nennt man die Zeit, in der eine Nachricht vom Sender zum Empfänger gelangt.

Die Laufzeit läßt sich durch schwächere Bepulung einer Kabelleitung herabsetzen.

6.8.4. Laufzeitverzerrungen

Da zur Nachrichtenübertragung ein ganzes Frequenzband benötigt wird, macht sich die unterschiedliche Laufzeit für tiefe und hohe Frequenzen störend bemerkbar. Infolge der Wirkung von Induktivitäten und Kapazitäten **brauchen höhere Frequenzen eine längere Laufzeit als tiefere Frequenzen**. Die Folge ist, daß beim Empfänger zuerst die tiefen und erst nach und nach die höheren Frequenzen ankommen. Eine Sprachübertragung klingt dann wie ein Zwitschern.

Laufzeitverzerrungen entstehen durch die verschiedenen Laufzeiten für tiefe und hohe Frequenzen.

Solche Laufzeitverzerrungen lassen sich durch entsprechende Laufzeitentzerrer beseitigen.

6.8.5. Geräusche

Ein Ferngespräch kann außerdem durch verschiedene Geräusche gestört werden:

- a) Raumgeräusche im Mikrophon der Sprechstelle,
- b) Netzbrummen aus der Stromversorgung,
- c) Beeinflussung durch Starkstromanlagen,
- d) Wählergeräusche,
- e) Röhrengeräusche (Systemklirren),
- f) Nebensprechen durch nichtgewünschte Kopplungen.

Geräusche auf Fernmeldeleitungen sind unerwünschte Fremdspannungen. Geräuschspannungen werden mit einem Geräuschspannungsmesser gemessen. Diesem wird ein Ohrfilter, ein sogenanntes A-Filter, vorgeschaltet, das eine dem menschlichen Ohr angepaßte Empfindlichkeit besitzt. Hierdurch werden nur die Geräusche gemessen, die auch das menschliche Ohr wahrnimmt. Die Geräuschspannung stört die Verständlichkeit in einem Übertragungsweg, sie darf daher einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten.

Geräusche sind unerwünschte Störspannungen auf Fernmeldeverbindungen. Sie sind daher möglichst niedrig zu halten.

6.9. Kopplungen

Innerhalb einer oberirdischen Linie und eines Kabels liegen die Leitungen verhältnismäßig dicht nebeneinander. Hierdurch kann eine gegenseitige Beeinflussung der Leitungen auftreten. Diese gegenseitige Beeinflussung bezeichnet man in der Fernmeldetechnik als Kopplung. Je nach ihrer Ursache können dabei

- a) galvanische,
- b) kapazitive und
- c) induktive Kopplungen

zu Störungen im Fernmeldebetrieb führen. Die Störungen werden als Nebensprechen, Übersprechen oder Mitsprechen bezeichnet.

6.9.1. Galvanische Kopplungen

Sie können auftreten, wenn zwischen zwei Leitungen eine **leitende Verbindung** besteht. Diese leitende Verbindung kann durch schlechte Isolation z. B. Feuchtigkeit oder gar „Absuff“ hervorgerufen werden. Sie kann aber auch in der Bauart begründet liegen, wenn z. B. mehrere nebeneinanderliegende Einzelleitungen gemeinsam die Erde als Rückleitung haben oder wenn bei Phantomschaltungen in einem Stamm ein Widerstandsunterschied zwischen der a- und b-Ader besteht.

6.9.2. Kapazitive Kopplungen

Zwischen zwei Leitern ist eine Kapazität vorhanden, die vom Abstand der Leiter, von ihrem Durchmesser, der Länge der Leiter und der Art des Isoliermaterials (Dielektrikum) abhängt. Da der Abstand der Leiter in Kabeln sehr gering ist, sind auch die **Kapazitäten** zwischen den Leitern einer Doppelader und ebenso **zwischen den Leitern benachbarter Doppeladern** verhältnismäßig groß. Über diese Kapazitäten können Nachrichtenwechselströme von einem Stromkreis in den anderen gelangen.

6.9.3. Induktive Kopplungen

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. Die Doppelleitung bildet eine Leiterschleife. Wird sie von einem Wechselstrom durchflossen, so **wird in die benachbarten Leiterschleifen – die ebenfalls von Feldlinien durchsetzt werden – infolge der Änderung des magnetischen Flusses eine Wechselfeldspannung induziert**. Diese Induktionsspannung ist um so größer, je mehr Feldlinien der ersten Leiterschleife die benachbarte Leiterschleife durchsetzen. Man kann die induktive Kopplung mit der Wirkungsweise eines Transformators ohne Eisenkern vergleichen.

6.9.4. Beseitigung der Kopplungen

Alle drei Kopplungsarten verursachen Störungen auf den Nachbarleitungen. Diese Störungen werden allgemein als Nebensprechen bezeichnet. Störungen zwischen Stamm und Stamm werden als **Übersprechen**, Beeinflussungen zwischen Stamm und Phantomkreis (Vierer) als **Mitsprechen** bezeichnet.

Zur Vermeidung oder Beseitigung der Kopplungen gibt es im wesentlichen zwei Möglichkeiten:

- a) konstruktive Maßnahmen bei der Herstellung von oberirdischen Linien und Kabeln,
- b) Montagemaßnahmen bei oder nach Montage einer Linie oder eines Kabels.

6.9.4.1. Konstruktive Maßnahmen

Grundsätzlich soll jede Fernmeldeverbindung, die aus mehreren Stromkreisen besteht, möglichst gleichmäßig (= symmetrisch) aufgebaut sein. Das gilt ganz besonders, wenn man die Leitungen mehrfach ausnutzen will (Phantomschaltung).

Galvanische Kopplungen können vor allem durch eine einwandfreie Isolation der Adern vermieden werden. Damit ein Übersprechen in Phantomschaltungen vermieden wird, müssen alle Einzeladern einen gleich großen ohmschen Widerstand haben. Diese Bedingung stellt an die Drahtziehereien hohe Anforderungen. Die Isolation muß für alle Adern eines Kabels die gleichen dielektrischen Eigenschaften haben.

Kapazitive und induktive Kopplungen werden durch die Verseilung der Adern stark herabgesetzt. Man muß bei Fernmeldekabeln unterscheiden zwischen:

Drall: Das gesamte Adernbündel (Kabelseele) wird zu einer festeren Einheit verbunden und ermöglicht durch den Drall eine gewisse Biegsamkeit (vgl. Biegsamkeit eines dicken Schiffstaues). Durch gegenläufigen Drall werden die einzelnen Lagen voneinander getrennt.

Verseilung der Adern: Durch die Art der Verseilung soll das Nebensprechen vermieden werden. Die Grundeinheit für die Verseilung war früher das Paar und ist heute im allgemeinen das Viererseil.

6.9.4.1.1. Verseilungsarten

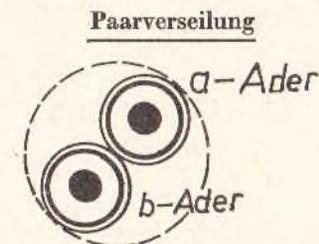
Durch die Verseilung erreicht man, daß die kapazitiven und induktiven Kopplungen für alle Adern nahezu gleich groß sind und sich gegenseitig mehr oder weniger aufheben. Den gleichen Zweck erfüllen die Kreuzungen und Platzwechsel in einer oberirdischen Linie.

Bei sehr langen oberirdischen Linien wurden diese Kreuzungen und Platzwechsel früher nach einem bestimmten Schema, dem sog. I-Schutzplan (Induktionsschutzplan), vorgenommen. Heute werden Kreuzungen und Platzwechsel im allgemeinen nur noch bei Bedarf angewendet, da es sehr lange o. i. Linien nicht mehr gibt.

Abgesehen von besonderen Kabeltypen (z. B. Signalkabel, Koaxialkabel) hat man bei NF-Kabeln drei Verseilungsarten zu unterscheiden:

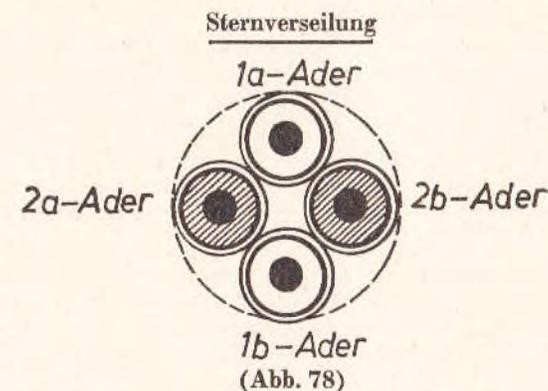
Paarverseilung	(P),
Sternverseilung	(St) und
Dieselhorst-Martin-Verseilung	(DM).

Bei der **Paarverseilung** werden zwei Adern zu einem Paar verseilt.



(Abb. 77)

Im **Sternviererseil** liegen vier Einzeladern vollkommen symmetrisch zueinander und werden als ganze Einheit verseilt.

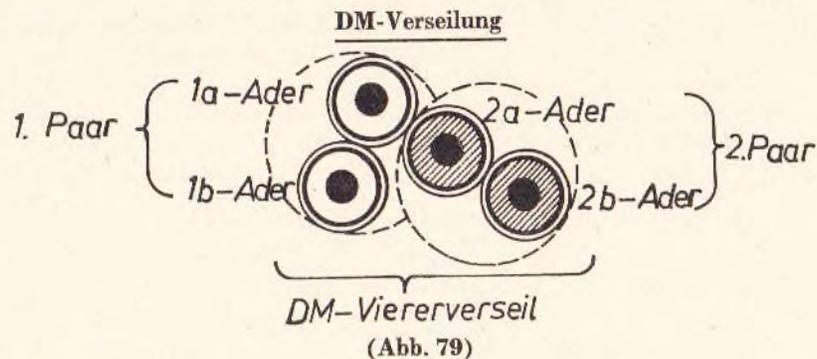


In sternverseilten Kabeln ist eine Mehrfachausnutzung durch Phantomschaltung für Fernsprechzwecke nicht möglich (zu geringes Frequenzband).

Das **Dieselhorst-Martin-Viererseil** ist aus zwei paarverseilten Doppeladern zusammengesetzt, die zu einem Viererseil verdreht sind.

Die DM-Verseilung läßt die Ausnutzung von Phantomkreisen für das Fernsprechen zu. DM-verseilte Kabel werden meistens als sogenannte **Bezirkskabel** (d. s. im allgemeinen Kabel ohne Verstärker) verlegt.

Die drei Verseilungsarten weisen z. T. erhebliche Unterschiede in den Übertragungseigenschaften auf. Wesentlich wirkt sich beispielsweise die Kapazität eines Vierers aus. In jedem Fall muß die Kapazität eines Vierers größer sein als die eines



Stammes, da ja die wirksame Fläche größer ist. Für die beiden Verseilungsarten Stern- und DM-Verseilung ergeben sich folgende Verhältnisse:

$$C_{\text{Sternvierer}} = 2,7 \cdot C_{\text{Stamm}}$$

$$C_{\text{DM-Vierer}} = 1,6 \cdot C_{\text{Stamm}}$$

Aus diesem Grunde ist der Sternvierer wegen zu großer Kapazität nicht für Fernsprechen geeignet.

6.9.4.2. Montagemaßnahmen

Mit der Festlegung enger Fertigungstoleranzen und mit der Verseilung sind die konstruktiven Maßnahmen zur Verminderung der Kopplungen im wesentlichen erschöpft. Dadurch allein kann jedoch nicht sichergestellt werden, daß Kopplungen und damit Nebensprechen im praktischen Betrieb nicht auftreten können. So treten z. B. Streuungen in den Leitungseigenschaften mehrerer Kabelstücke auf, wenn diese nicht aus einer Fertigungsserie oder gar von verschiedenen Herstellern kommen, oder wenn Kabel mit unterschiedlicher DA-Zahl zusammengesetzt werden. Diese Tatsache macht zusätzliche Maßnahmen bei oder nach Auslegung und Montage einer Kabelverbindung erforderlich.

Für den Kopplungsausgleich kommen drei Maßnahmen in Frage:

- a) Widerstandsausgleich,
- b) Kondensatorenausgleich und
- c) Kreuzungsausgleich.

6.9.4.2.1. Widerstandsausgleich

Trotz enger Fertigungstoleranzen können die einzelnen Adern im Kabel unterschiedliche Widerstände aufweisen. Diese Unterschiede werden größer, wenn z. B. zwei Stämme verbunden werden, in denen die gleichen Unterschiede zwischen den Einzeladern auftreten.

Beispiel:

	1. Kabelstück	2. Kabelstück	gesamte Kabelstrecke
Leiter 1a	15 Ω	15 Ω	30 Ω
Leiter 1b	17 Ω	17 Ω	34 Ω

Um den Widerstandsunterschied auszugleichen, wendet man zwei Verfahren an:

- a) zusätzlicher Einbau eines Widerstandsdrahtes in die Einzelader mit dem geringeren Widerstand oder
- b) Kreuzung der Adern.

Auf unser Beispiel angewendet, müßte in die Spleißstelle für die Ader 1a ein Widerstand von 4 Ω eingesetzt werden. Dann hätten beide Leiter einen Gesamt Widerstand von je 34 Ω . Würde man in der Spleißstelle die Adern 1a und 1b kreuzen, dann würde sich für jede Ader auf der Gesamtstrecke ein Widerstand von 32 Ω ergeben.

Um den Widerstand einer Kabelstrecke nicht unnötig zu erhöhen (Erhöhung der Dämpfung), zieht man das Kreuzungsverfahren zum Widerstandsausgleich im allgemeinen dem anderen Verfahren vor.

6.9.4.2.2. Kondensatorenausgleich

Er wird hauptsächlich in bespulten Kabeln und Trägerfrequenzkabeln angewendet. Dabei werden in Doppeladern, deren Teilkapazitäten kleiner sind als die der übrigen Doppeladern, zusätzlich Kondensatoren eingeschaltet. Durch den Kondensatorenausgleich werden die Teilkapazitäten eines Viererseils auf den Wert der größten Teilkapazität erhöht. Für den Kondensatorenausgleich werden alle Teilkapazitäten eines Viererseils herangezogen. Auch hier gibt es natürlich die Möglichkeit, unterschiedliche Teilkapazitäten beim Zusammensetzen zweier Kabelstrecken durch Kreuzen der Adern oder Stämme auszugleichen.

6.9.4.2.3. Kreuzungsausgleich

Die wichtigste, vielseitigste aber damit auch schwierigste Ausgleichsmöglichkeit ist der Kreuzungsausgleich. Wie bereits festgestellt worden ist, kann man durch Kreuzung Widerstands- und Kapazitätsunterschiede ausgleichen. Die Hauptaufgabe des Kreuzungsausgleichs ist aber die Beseitigung der induktiven Kopplungen.

Kreuzungsmöglichkeiten in einem Viererseil

Kreuzungs Nr.	Schaltung	Kreuzungs Nr.	Schaltung
1	1 ^a 2 ^a	5	1 ^a 2 ^a
2	1 ^a 2 ^a	6	1 ^a 2 ^a
3	1 ^a 2 ^a	7	1 ^a 2 ^a
4	1 ^a 2 ^a	8	1 ^a 2 ^a

(Abb. 80)

Für den Kreuzungsausgleich innerhalb eines Viererseils gibt es 8 Schaltungsmöglichkeiten, die nach der Übersicht (Abb. 80) mit einer Nr. bezeichnet werden.

Die Kreuzung der Kabeladern würde natürlich Schwierigkeiten bei der Fehlerengrenzung zur Folge haben, da z. B. die Ader Ia am Kabelabschluß der nächsten Endstelle nicht mehr auf Platz Ia ankäme. Daher ist jede Kreuzung vor dem Kabelabschluß wieder auszugleichen, so daß die Reihenfolge der Kabeladern an Kabelanfang und -ende stets gleich ist. Man nennt diese Maßnahme Rückkreuzen. Außerdem wird für alle Kabel, bei denen ein Kreuzungsausgleich vorgenommen worden ist, ein sog. Kreuzungsplan aufgestellt.

6.9.4.3. Zusammenfassung

Alle genannten Maßnahmen dienen dem Zweck, Nebensprech- und Übersprechkopplungen unter eine festgelegte Mindestgrenze zu drücken. Eine Ausgleichsmontage wird im allgemeinen nur bei hochwertigen Kabeln, wie OVK, Bzk und Fk durchgeführt. In den verhältnismäßig kurzen Ortskabeln liegen die Kopplungen meistens unter den Höchstwerten, so daß sich hier zusätzliche Ausgleichsarbeiten erübrigen.

In allen Kabelarten können dagegen Kopplungen durch unsachgemäße Montage, wie

- Feuchtigkeit in den Lötstellen,
- sog. Überziehen von DA oder Viererseilen,
(falsche Adernreihenfolge beim Spleißen)
- schlechte Würgeverbindungen usw.

hervorgerufen werden.

6.10. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 6.8. und 6.9.

1. Was versteht man unter Dämpfungsverzerrungen und wodurch werden sie hervorgerufen? 2. Wodurch entstehen nichtlineare oder Klirrvverzerrungen? 3. Durch welche Angabe werden Klirrvverzerrungen gekennzeichnet? 4. Was versteht man unter dem Begriff Laufzeit? 5. Wie groß darf die Laufzeit beim Fernsprechen insgesamt sein? 6. Erläutern Sie den Begriff Laufzeitverzerrungen! 7. Wie äußern sich bei einer elektroakustischen Übertragung Laufzeitverzerrungen? 8. Welche Art von Störungen faßt man unter dem Begriff Geräusche zusammen? 9. Was versteht man in der Fernmeldetechnik unter Kopplungen? 10. Erläutern Sie folgende Begriffe und deren Ursachen: Galvanische Kopplungen, kapazitive Kopplungen und induktive Kopplungen! 11. Wann spricht man von Übersprechen, wann von Mitsprechen? 12. Welche Aufgaben erfüllen Drall und Verseilung in einem Fernmeldekabel? 13. Skizzieren und erläutern Sie die drei Verseilungsarten Paar-, Stern- und Dieselhorst-Martin-Verseilung! 14. Warum ist ein Phantomkreis in einem sternverseilten Kabel nicht für Fernsprechzwecke ausnutzbar? 15. Welche grundsätzlichen Maßnahmen werden zur nachträglichen Kopplungsbeseitigung in Fernmeldekabeln angewendet?

7. Die Mehrfachausnutzung von Leitungen

Da die Fernmeldeleitungen der teuerste Teil einer Fernmeldeanlage sind, liegt es nahe, sie mehrfach auszunutzen. In Ortsnetzen werden zu diesem Zweck z. B. sog. Zweieranschlüsse geschaltet, wobei für zwei Fernsprechanlüsse nur eine Anschlußleitung zur Vermittlungsstelle vorhanden ist. Der Zweieranschluß stellt jedoch nicht im eigentlichen Sinne eine Mehrfachausnutzung dar, da ein gleichzeitiger Betrieb beider Sprechstellen nicht möglich ist.

Im Fernnetz werden überwiegend zwei Maßnahmen zur Mehrfachausnutzung von Fernmeldeleitungen angewendet: Die Phantomschaltungen und die Trägerfrequenztechnik. Beide Techniken ermöglichen **bei Mehrfachausnutzung einen gleichzeitigen Betrieb auf allen Übertragungswegen ohne gegenseitige Beeinflussung.**

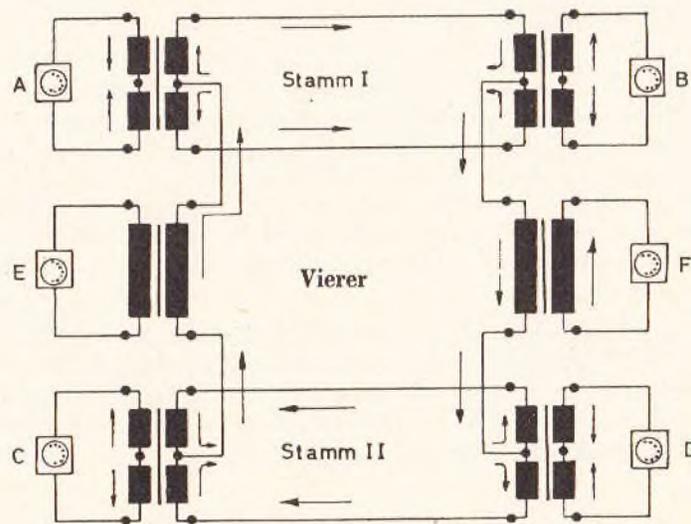
7.1. Die Phantomschaltung

Die Abb. 81 zeigt eine Phantom- oder Viererschaltung. Zwei Doppelleitungen (Stamm I und Stamm II) werden an ihren Enden mit einem Fernleitungsübertrager abgeschlossen. Die Primärseiten der Übertrager sind (unter Einschaltung der Amtseinrichtungen) mit den Teilnehmern A, B, C und D verbunden. Die Sekundärseiten bilden den Abschluß der Fernleitungen. Wir können jetzt mit Hilfe zweier weiterer Übertrager einen dritten Sprechkreis schaffen, ohne den Sprechverkehr auf den Stammleitungen zu stören.

An die Primärseiten der beiden zusätzlichen Übertrager werden die Teilnehmer E und F angeschlossen. Die Sekundärklemmen werden mit den Mitten der Sekundärwicklung der Übertrager in den Stämmen I und II verbunden, wie es Abb. 81 zeigt. **Diesen neu geschaffenen dritten Sprechkreis nennt man Vierer- oder Phantomkreis.** Mit Hilfe der in die Abb. 81 eingezeichneten Pfeile soll die Wirkungsweise dieser Schaltung erläutert werden:

Sobald der Teilnehmer E spricht, fließt Sprechwechselstrom in Richtung des Pfeiles zur Mitte des Übertragers, der den Stamm I in Richtung des Teilnehmers A abschließt. Hier verzweigt er sich zu gleichen Teilen, die über die Zweige a und b der Stammleitung I zum Übertrager dieser Leitung in Richtung Teilnehmer B fließen. Der Stromweg führt weiter über den Sekundärteil des Übertragers zum Teilnehmer F, dann zum Sekundärteil des Übertragers zum Teilnehmer D, hier wieder Verzweigung und Weiterfluß der Hälften über a- und b-Zweig der Leitung II zur Sekundärseite des Übertragers zum Teilnehmer E. Teilnehmer E kann also mit Teilnehmer F sprechen. Die Teilnehmer A, B, C und D können jedoch von dem zwischen E und F geführten Gespräch nichts wahrnehmen, weil die Zweigströme durch die Wicklungshälften ihrer zugehörigen Übertrager gleich groß sind und entgegengesetzte Richtung haben, so daß sie sich in ihrer Induktionswirkung in den Primärseiten aufheben.

Die Phantom- oder Viererschaltung



(Abb. 81)

Durch die Phantomschaltung wird aus zwei vorhandenen Doppelleitungen mit Hilfe von Übertragern ein dritter Übertragungsweg (Vierer) geschaffen.

Da in Fernsprechnetzen mit Gleichstrom gearbeitet werden muß (z. B. Mikrofonspeisung), Übertrager aber nur eine Wechselstromübertragung zulassen, sind hier Phantomschaltungen nicht anwendbar.

7.2. Die Trägerfrequenztechnik

Die Trägerfrequenztechnik ist – wie die Phantomschaltung – grundsätzlich auf alle Nachrichtenarten anwendbar. Hier soll die Trägerfrequenztechnik am Beispiel des Fernsprechens erläutert werden. Die beschriebenen Vorgänge gelten für die anderen Nachrichtenarten sinngemäß.

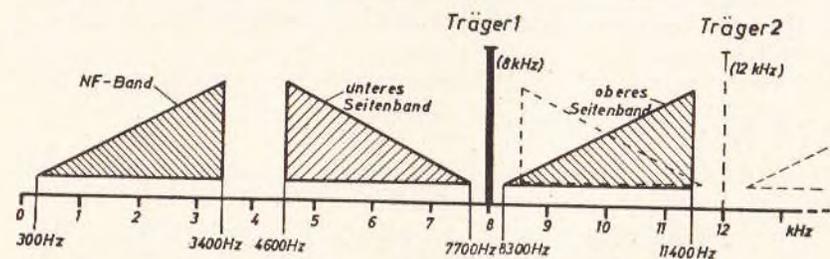
Wir haben den Begriff Träger bereits im Kapitel Leitungstechnik kennengelernt. Ein Nachrichtenträger einfachster Form ist ein Gleichstrom, der z. B. durch die im Rhythmus der Schallwellen hervorgerufenen Widerstandsänderungen des Mikrofons moduliert wird. Modulieren bedeutet beeinflussen bzw. formen.

In der Trägerfrequenztechnik benutzt man auf der Sendeseite einen mehr oder weniger hochfrequenten Wechselstrom als Träger. Wird dieser Träger mit der Nachricht – beim Fernsprechen also einem Frequenzband von 300 ... 3400 Hz – moduliert, so ergibt sich aus Gründen, die wir hier nicht näher erläutern wollen, ein sog. oberes und unteres Seitenband. Die Seitenbänder entstehen durch

- die Summe Trägerfrequenz + Nachrichtenfrequenzband (oberes Seitenband)
- die Differenz Trägerfrequenz – Nachrichtenfrequenzband (unteres Seitenband).

Liegt die Trägerfrequenz hoch genug über dem Nachrichtenfrequenzband, so hat man nun zwei Übertragungsbereiche geschaffen, die frequenzmäßig voneinander getrennt sind.

Entstehung der Seitenbänder bei der Modulation eines Trägers



(Abb. 82)

Obige Abbildung veranschaulicht das Verfahren

Links ist das normale sog. NF-Fernsprechband¹⁾ 300 ... 3400 Hz dargestellt.

(Es ist üblich, das Nachrichtenfrequenzband so zu zeichnen, daß die Höhe des Dreiecks mit der Nachrichtenfrequenz steigt.)

Daneben erkennt man die durch Modulation des Trägers (8 kHz) entstandenen Seitenbänder. Da sich das untere Seitenband aus der Differenz Träger-Nachrichtenfrequenzband ergibt, liegt es umgekehrt; man spricht von einer Kehrlage.

Jedes Seitenband enthält aber den Nachrichteninhalt. Man kann daher ein Seitenband unterdrücken, ohne daß der Nachrichteninhalt selbst irgendwie beeinträchtigt wird. Würden wir in unserem Beispiel das obere

¹⁾ NF = Niederfrequenz

Seitenband z. B. durch einen **Sperrkreis** beseitigen, so könnten wir an dessen Stelle ein weiteres unteres Seitenband der Trägerfrequenz 12 kHz unterbringen (Einseitenband-Übertragung). Auf diese Weise erreicht man nun, daß man in Abständen von 4 kHz u. U. eine Vielzahl von sog. Fernsprechkanälen schaffen kann. Die Grenze nach oben ist nur durch die obere Grenzfrequenz der verwendeten Fernmeldeleitung gesetzt. Auf der Empfangsseite kann man die entsprechenden Fernsprechkanäle mit Hilfe von **Bandfiltern** wieder trennen.

Das beschriebene Verfahren ähnelt der vom Rundfunk her bekannten Funkübertragung mit dem Unterschied, daß in der Trägerfrequenztechnik nicht der freie Raum, sondern eine Drahtleitung als Übertragungsweg dient.

Im Bereich der Bundespost sind z. B. Trägerfrequenzsysteme im Gebrauch, bei denen die gleichzeitige Übertragung von 1260 oder gar 2700 Ferngesprächen auf einer Fernmeldeleitung möglich ist.

Die Trägerfrequenztechnik macht es durch die frequenzmäßige Verlagerung der Nachrichteninhalte möglich, eine Vielzahl von Nachrichten gleichzeitig über eine einzige Fernmeldeleitung zu übermitteln.

7.2.1. Trägerfrequenz-Systeme

Damit die Nachrichten bei der Trägerfrequenztechnik nicht in den eigenen Empfänger gelangen, werden zwei Systeme angewendet,

- das **Zweidraht-Getrenntlage-Verfahren** (Z-System) oder
- das **Vierdraht-Gleichlage-Verfahren** (V-System).

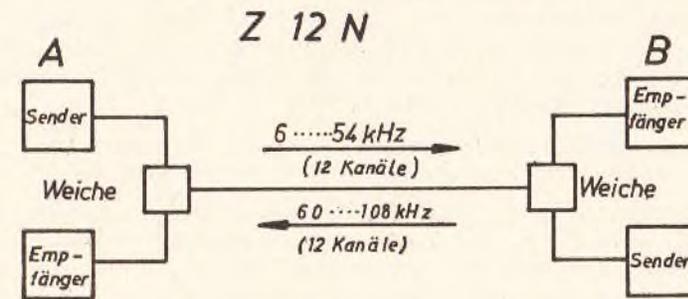
Von der Technik des Fernsprechapparats her dürfte die sog. Rückhördämpfungsschaltung (siehe Band C 4 des „Handbuchs der Fernmelde-technik“) bekannt sein. Auch sie erfüllt die Aufgabe, die Sprechwechselströme des eigenen Mikrofons zumindest nur in geringem Anteil an den eigenen Fernhörer gelangen zu lassen. Das Z-System ähnelt in gewissem Sinne der Rückhördämpfungsschaltung.

7.2.1.1. Das Zweidraht-Getrenntlage-Verfahren

Dabei werden für die **Senderrichtung** (A-B) und die **Empfangsrichtung** (B-A) verschiedene Frequenzbänder benutzt, die je für sich wieder in eine Vielzahl von Trägerfrequenzkanälen aufgeteilt sind.

Da z. B. der Empfänger A auf ein anderes Frequenzband abgestimmt ist als der Sender A, kann hier keine Beeinflussung auftreten. Auf der anderen Seite (B) ist es genauso. Die Trennung der Frequenzbänder wird mit elektrischen **Weichen** vorgenommen. Diese Weichen bestehen aus einem Hochpaß für das obere Frequenzband und einem Tiefpaß für das untere

Zweidraht-Getrenntlage-Verfahren



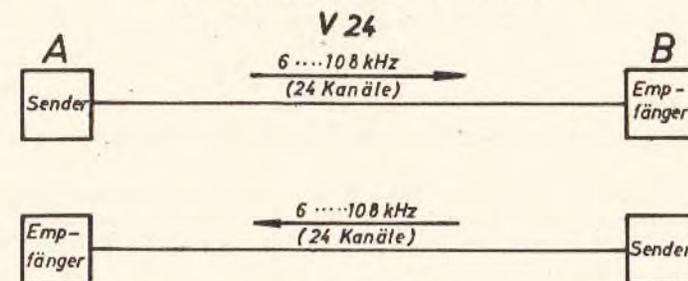
(Abb. 83)

Frequenzband (über Hoch- und Tiefpaß siehe Teil I dieses Handbuchs). Trägerfrequenzsysteme, die nach dem Zweidraht-Getrenntlage-Verfahren arbeiten, erhalten eine Kurzbezeichnung, die sich aus dem Z (für das System) und einer Zahl (für die Anzahl der Kanäle) zusammensetzt. Zum Beispiel Z 12 = Zweidraht-Getrenntlage-System mit 12 Kanälen. Zudem kann z. B. durch den angehängten Buchstaben N ausgedrückt werden, daß es sich um ein System für den Nahverkehr handelt.

7.2.1.2. Das Vierdraht-Gleichlage-Verfahren

Eine frequenzmäßige Trennung für die Sende- und Empfangsrichtung ist nicht notwendig, wenn man für **beide Richtungen je eine besondere Fernmeldeleitung** benutzt. Praktisch wird heute sogar für die Sende- und Empfangsrichtung je ein besonderes Trägerfrequenzkabel ausgelegt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „zweigleisigen“ Kabelstrecke. Der Kostenaufwand für das Vierdraht-Gleichlage-Verfahren

Vierdraht-Gleichlage-Verfahren



(Abb. 84)

scheint erheblich höher zu liegen als für das Z-Verfahren. Doch der Schein trügt: Die beiden Kabel werden in einem Kabelgraben verlegt, so daß sich die Kosten für die Erdarbeiten auf beide Kabel verteilen. Da aber auch eine frequenzmäßige Trennung zwischen Sende- und Empfangsrichtung entfällt, kann jetzt bei gleichem Frequenzbereich die doppelte Anzahl an Trägerfrequenzkanälen geschaffen werden.

Wegen der besseren Vergleichsmöglichkeit zwischen Z- und V-System sind in den Abb. 83 und 84 einfache Trägerfrequenzsysteme dargestellt worden.

Trägerfrequenzsysteme, die nach dem Vierdraht-Getrenntlage-Verfahren arbeiten, werden in der Kurzbezeichnung durch den Buchstaben V an erster Stelle gekennzeichnet. Zum Beispiel V 960 = Vierdraht-Getrenntlage-System mit 960 Kanälen. Für den Fernverkehr werden nur V-Systeme benutzt, da hierbei auch der Abgleich der elektr. Weichen entfällt.

7.3. Leitungen und Kabel für Trägerfrequenzbetrieb

Für den Trägerfrequenzbetrieb werden an die Fernmeldeleitungen besonders hohe Anforderungen gestellt. Wegen der mit der Frequenz steigenden dielektrischen Verluste kann nicht mehr die Papier-Luft-Isolation angewendet werden. An die Stelle des Papiers treten bei Trägerfrequenzkabeln Isolierstoffe, wie z. B. Styroflex, Calit oder Frequenta. Um auch hier die Kapazität gering zu halten, wird wie bei gewöhnlichen Fernsprechkabeln die Dielektrizitätskonstante durch großen Lufteinschluß herabgesetzt.

Das erreicht man durch eine Kunststoffkordel mit darübergewickelterm Kunststoffband (wie beim Papier-Luft-isolierten Kabel) oder durch Schaumstoffe mit vielen Lufteinschlüssen. Ganz besonders für den Trägerfrequenzbetrieb geeignet sind die modernen Koaxialkabel¹⁾. Sie bestehen aus einem Kupferrohr, in dem im Inneren isoliert ein Draht angeordnet ist. Kupferrohr und Draht bilden hier die Einzelleitungen. Auf Koaxialkabeln moderner Bauart läßt sich ein Frequenzband bis über 12 MHz übertragen, was die gleichzeitige Übermittlung von 2700 Ferngesprächen oder von 1 Fernsehprogramm und etwa 1200 Gesprächen ermöglicht.

7.4. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 7.1. bis 7.3.

1. Warum werden Fernmeldeleitungen mehrfach ausgenutzt? 2. Skizzieren Sie eine Phantomschaltung und erläutern Sie anhand des Stromverlaufs, warum keine gegenseitige Beeinflussung zwischen Stamm und Vierer auftritt! 3. Welche Eigen-

¹⁾ koaxial = gemeinsame Achse (d. h. die Achse des Kupferrohres fällt mit der Achse des Innenleiters zusammen).

schaften müssen die Stammleitungen und Übertrager haben, damit ein Mitsprechen zwischen Stamm und Vierer ausgeschlossen ist? 4. Warum werden Phantomschaltungen nicht in Fernsprechnetzen angewendet? 5. Was ergibt sich aus der Modulation eines Wechselstromträgers mit einem Nachrichtenfrequenzband? 6. Warum kann man eines der beiden Seitenbänder unterdrücken? 7. Wodurch ist die Zahl der möglichen Trägerfrequenzkanäle bei einer bestimmten Fernmeldeleitung begrenzt? 8. Skizzieren Sie das Schema für ein sog. Zweidraht-Getrenntlage-Verfahren! 9. Welches sind die wesentlichen Merkmale des Z-Systems? 10. Skizzieren Sie das Schema eines sog. Vierdraht-Gleichlage-Verfahrens! 11. Welches sind die wesentlichen Merkmale des V-Systems? 12. Warum wird in Trägerfrequenzkabeln nicht mehr Papier als fester Isolierstoff verwendet? 13. Wie erreicht man trotz Kunststoffisolation eine geringe Leitungskapazität? 14. Was versteht man unter einem Koaxialkabel?

8. Elektronenröhren

8.1. Elektronenemission

In metallischen Leitern sind die Elektronen der äußeren Elektronenschalen verhältnismäßig leicht gebunden. Ein Teil der Elektronen ist „frei“. Diese freien Elektronen sind nicht fest an ein bestimmtes Atom gebunden. Sie bewegen sich im Leiter in allen Richtungen willkürlich durcheinander. Ihre Bewegung kann durch Anlegen einer äußeren Spannung gerichtet werden. Aufgrund ihrer negativen Ladung werden die Elektronen vom Pluspol (Anode) der Spannungsquelle angezogen.

Wird einem Leiter von außen her Energie zugeführt, so kann die Bewegungsgeschwindigkeit der freien Elektroden so groß werden, daß ein Teil aus der Leiteroberfläche herausgeschleudert (= emittiert) wird. Dieses Herausschleudern von Elektronen nennt man **Elektronenemission**.

Je nach ihrer Ursache unterscheidet man im wesentlichen drei Arten der Elektronenemission:

Fotoemission

Durch Einwirkung von Wellenenergie (Licht), z. B. durch Belichtung bestimmter Stoffe (Cäsium), werden Elektronen emittiert und von einer positiv vorgespannten Elektrode aufgefangen.

Anwendung in der Fotozelle.

Thermische Emission

Durch Erwärmung eines Leiters nimmt die Bewegungsgeschwindigkeit der freien Elektronen zu, bis sie aus dem Gefüge herausgeschleudert werden. Die Menge der herausgeschleuderten Elektronen hängt von der Temperatur und dem Material des Leiters ab.

Sekundäremission

Treffen Elektronen oder Ionen mit hoher Geschwindigkeit z. B. auf eine Metalloberfläche, so übertragen sie ihre Bewegungsenergie auf die im Metall befindlichen Elektronen und schleudern diese aus der Oberfläche heraus. Oft ist die Zahl der herausgeschleuderten Elektronen dabei größer als die Zahl der auftreffenden Elektronen oder Ionen.

Die Sekundäremission kann sich in Elektronenröhren nachteilig auswirken. Sie kommt dort durch den Aufprall schneller Elektronen auf das Anodenblech zustande.

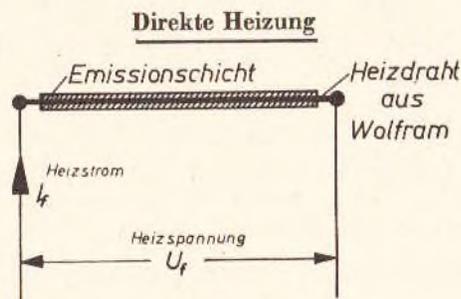
8.2. Röhrenheizung

Bei der Elektronenröhre nutzt man die thermische Elektronenemission an einem elektrisch geheizten Leiter aus. Wegen seines verhältnismäßig hohen Schmelzpunktes wird als Heizdraht meistens Wolfram verwendet. Da jedoch Wolfram keine besonders gute Elektronenemission aufweist, bringt man auf den Wolframfaden einen anderen Stoff mit besseren Emissionseigenschaften auf. Besonders eignen sich dafür Bariumoxid oder Strontiumoxid, deren Elektronenemission bei gleicher Temperatur (ca. 800 °C) etwa 3mal so groß ist wie die des Wolframs.

Bei einer Röhrenheizung unterscheidet man zwei Arten des Aufbaues:

8.2.1. Direkte Heizung

Die Emissionsschicht kann unmittelbar auf den Wolfram-Heizfaden aufgetragen werden.



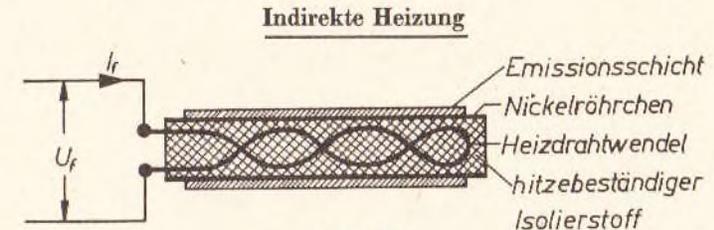
Da die Schicht direkt durch den Heizfaden erwärmt wird, nennt man diese Art **direkte Heizung**.

Vorteile: schnelle Anheizzeit, geringer Heizleistungsbedarf.

Nachteile: stoßempfindlicher, nicht für Wechselstromheizung geeignet.

8.2.2. Indirekte Heizung

Isoliert vom eigentlichen Heizfaden wird ein Röhrchen aus Nickel oder einer Nickellegierung angebracht. Auf diesem Röhrchen befindet sich außen die Emissionsschicht.



Diese Art der Röhrenheizung nennt man **indirekte Heizung**.

Infolge der Isolierung des Heizdrahtes ist natürlich der Wärmeübergang vom Heizfaden zur wirksamen Schicht schlechter und damit auch der Heizleistungsbedarf größer als bei direkter Heizung. Der Heizfaden ist dementsprechend dicker und unempfindlicher gegen Stoß.

Vorteile der indirekten Heizung: zur Heizung kann Wechselstrom verwendet werden. Unempfindlich gegen Heizstromschwankungen.

Nachteile: größerer Heizleistungsbedarf, längere Anheizzeit.

Aus schaltungstechnischen Gründen und wegen der Möglichkeit, Wechselstrom zur Röhrenheizung zu verwenden, gibt man heute im allgemeinen der indirekten Heizung den Vorzug. Die direkte Heizung wird im wesentlichen nur noch dort angewendet, wo es auf möglichst geringen Heizstromverbrauch ankommt (Batterieröhren).

Vergleich: direkte Heizung $U_f = 1,4 \text{ V}$, $I_f = 25 \text{ mA}$
 $P = U \cdot I = \underline{0,035 \text{ Watt}}$

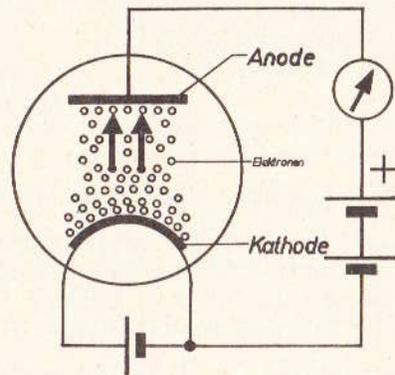
indirekte Heizung $U_f = 6,3 \text{ V}$, $I_f = 200 \text{ mA}$
 $P = U \cdot I = \underline{1,26 \text{ Watt}}$

8.3. Elektronenröhren

Bringt man in einem luftleer gepumpten Glaskolben gegenüber einem Heizfaden eine Elektrode an, so wird bei Erwärmung des Heizfadens ein Teil der emittierten Elektronen zu der Gegenelektrode fliegen. Ihre Zahl

ist jedoch äußerst gering, da die negativ geladene Elektronenwolke (Raumladungswolke) über dem Heizfaden den Austritt weiterer Elektronen erschwert und die Geschwindigkeit der Elektronen noch verhältnismäßig gering ist. Bringt man jedoch in den äußeren Stromkreis eine Spannung, das Pluspotential an der Gegenelektrode, so werden fast alle emittierten Elektronen von der positiven Elektrode (Anode) angezogen.

Elektronenstrom in einer Zweipolröhre



(Abb. 87)

Die Bewegungsgeschwindigkeit der Elektronen hängt dabei von der Spannung zwischen Anode und Kathode ab:

$$v = 600 \sqrt{U} \frac{\text{km}}{\text{s}}, \text{ d.h. sie beträgt}$$

$$\text{bei 1 V ca. } 600 \frac{\text{km}}{\text{s}},$$

$$\text{bei 100 V ca. } 6000 \frac{\text{km}}{\text{s}},$$

$$\text{bei 10000 V ca. } 60000 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Kehrt man die Polarität der angelegten Spannungsquelle um, so können keine Elektronen vom Heizfaden zur anderen Elektrode gelangen, da sich gleiche Ladungen abstoßen.

Die Elektronenröhre läßt den Elektronenstrom nur in einer Richtung durch.

8.3.1. Zweipolröhre (Diode)

Eine Röhre mit zwei Elektroden:

dem Heizsystem (Kathode) und
der Gegenelektrode (Anode)

bezeichnet man als Zweipolröhre.

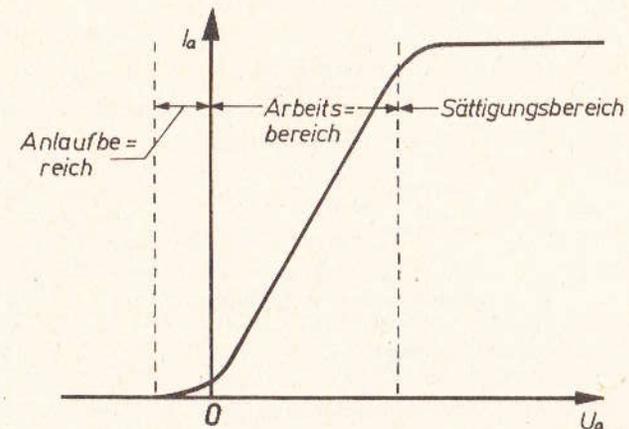
Wegen der Eigenschaft, den Elektronenstrom nur in einer Richtung durchzulassen, wird die Zweipolröhre als Gleichrichter verwendet.

Trägt man den Röhrenstrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung in ein Diagramm, so erkennt man an der Kennlinie:

- a) Schon bei einer Anodenspannung von 0V fließt ein geringer Strom durch die Röhre. Er hat eine Stärke von ca. 1 mA und kommt durch diejenigen Elektronen zustande, die bei der Elektronenemission stark genug beschleunigt worden sind.

Man nennt diesen Strom **Anlaufstrom**. Er wird in der modernen Röhrentechnik dazu benutzt, in Anfangsstufen die Gittervorspannung einer Röhre zu erzeugen.

Kennlinie einer Zweipolröhre



(Abb. 88)

b) Wird an die Anode eine positive Spannung gelegt, so steigt mit wachsender Spannung der Anodenstrom der Röhre. Innerhalb eines bestimmten Bereichs ist der Anstieg der Kennlinie nahezu geradlinig. Diesen Bereich der Kennlinie bezeichnet man als **Arbeitsbereich**.

c) Steigert man die Höhe der Anodenspannung immer weiter, so ist schließlich keine Steigerung des Anodenstroms mehr zu erreichen. Grund: Sämtliche von der Kathode emittierten Elektronen werden sofort von der Anode aufgenommen.

Diesen Kennlinienbereich nennt man **Sättigungsbereich**.

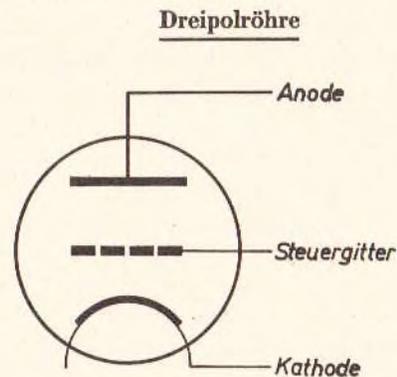
Bei modernen Elektronenröhren kann der Sättigungsbereich nicht erreicht werden, da er wegen der hochentwickelten Emissionsschichten so hoch liegt, daß die Röhre zerstört würde.

d) Kehrt man die Polarität der Anodenspannung um, so fließt kein Anodenstrom. Grund: Die negativ geladene Anode stößt die ebenfalls negativ geladenen Elektronen ab.

Voraussetzung für das ungestörte Fließen des sogenannten Anodenstroms ist ein ausreichendes Vakuum in der Röhre. Etwa noch vorhandene Gasreste werden ionisiert. Dadurch kommt es zu einer Gasentladung (Glimmentladung), die zur Zerstörung der Röhre führen kann. Zur chemischen Bindung der Gasreste wird in die Röhren ein sogenannter „**Getter**“ eingebaut. Wird die Röhre zu stark belastet, so werden durch die Erwärmung des Anodenblechs Gase frei, die das einwandfreie Arbeiten der Röhre beeinträchtigen.

8.3.2. Dreipolröhre (Triode)

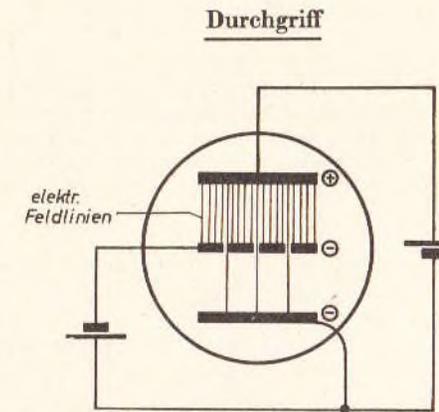
Mit Hilfe einer dritten Elektrode, die zwischen Heizfaden (Kathode) und Gegenelektrode (Anode) angebracht wird, kann man den Elektronenstrom



in der Röhre beeinflussen (steuern). Diese meistens wendelförmige Drahtelektrode wird als **Steuergitter** bezeichnet.

8.3.2.1. Durchgriff

Da sich das Steuergitter (auch kurz „Gitter“ genannt) in unmittelbarer Nähe der Kathode befindet, beeinflusst es mit seiner Spannung den Elektronenstrom. Die Anodenspannung kann dagegen nur mit einem Bruchteil ihres Betrages wirken, weil nur ein Teil der elektrischen Feldlinien durch das Gitter „hindurchgreift“.



Den für die Stärke des Anodenstroms wirksamen Anteil der Anodenspannung bezeichnet man daher auch als „**Durchgriff**“ **D**. Er wird in % der Anodenspannung angegeben. Für die Stärke des Elektronenstroms in der Röhre sind also maßgebend:

1. die Spannung am Steuergitter und
2. der wirksame Anteil der Anodenspannung.

Legen wir an das Steuergitter der Röhre eine genügend hohe negative Spannung, so werden die von der Kathode emittierten negativen Elektronen durch das Gitter abgestoßen. Es fließt somit kein Strom durch die Röhre. Läßt man jetzt die Gitterspannung langsam Null werden, dann wird der Elektronenstrom immer stärker zur Anode fließen, da die hemmende Wirkung des Gitters nachläßt.

(Achtung!: Das Gitter darf im allgemeinen nicht positives Potential haben, da dann der Anodenstrom so stark wird, daß die Röhre zerstört wird. Daher muß das Gitter immer eine negative Vorspannung erhalten.)

8.3.2.2. Die Steuerwirkung des Gitters (I_a/U_g -Kennlinie)

Die Stärke des Elektronenstroms hängt von der elektrischen Feldstärke in der Umgebung der Kathode ab.

Um die Steuerwirkung des Gitters zu erkennen, wählen wir ein vereinfachtes Beispiel:

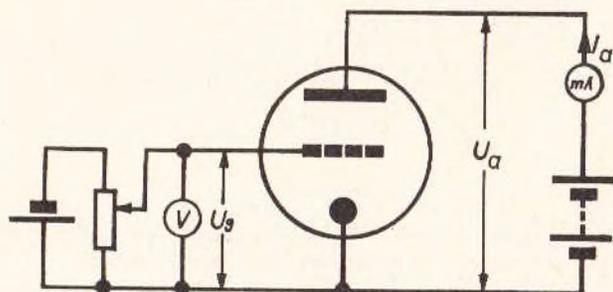
Der Abstand zwischen Anode und Kathode soll 2 cm, der Abstand zwischen Gitter und Kathode 1 cm betragen. Legt man zwischen Anode und Kathode eine Spannung von 100 V an, so beträgt die Feldstärke

$$E_a = \frac{100 \text{ V}}{2 \text{ cm}} = 50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

Um die Wirkung dieser Feldstärke auf den Elektronenstrom aufzuheben, muß man zwischen Gitter und Kathode eine Spannung entgegengesetzter Richtung anlegen. Diese Spannung muß eine gleich große, aber entgegengerichtete Feldstärke erzeugen. Da der Abstand Gitter-Kathode nur halb so groß ist wie der Abstand Anode-Kathode, genügt auch die halbe Spannung (-50 V), um die Wirkung der Anodenspannung aufzuheben; denn die Feldstärke Gitter-Kathode beträgt damit

$$E_g = \frac{-50 \text{ V}}{1 \text{ cm}} = -50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

Steuerung der Triode

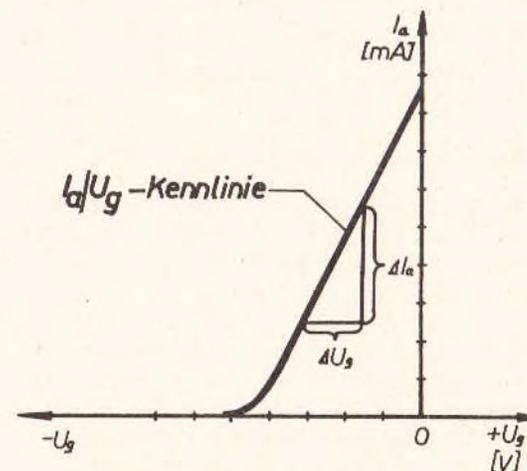


(Abb. 91)

Verringert man nun den Abstand zwischen Gitter und Kathode immer weiter, so genügt eine immer geringere Spannung zur Aufhebung der Anodenwirkung. Die Steuerwirkung des Gitters wird also um so größer, je geringer der Abstand Gitter-Kathode gemacht wird. In Röhren mit sog. Spanngitter wird ein äußerst geringer Gitter-Kathode-Abstand von etwa 30 μm und damit eine große Verstärkerwirkung erreicht.

Um die Steuerwirkung des Gitters zu erkennen, stellt man meistens für eine Dreipolröhre die sogenannte I_a/U_g -Kennlinie dar. Dabei wird der

Anodenstrom I_a in Abhängigkeit von der Spannung U_g dargestellt. Die Anodenspannung bleibt dabei konstant (siehe Abb. 92)!



(Abb. 92)

Da in der Röhre keine Elektronen zum negativen Steuergitter gelangen (gleiche Ladungen stoßen sich ab), kann im Gitterkreis auch kein Strom fließen.

Daraus folgt:

Zur Steuerung einer Verstärkeröhre wird im Gitterkreis keine Leistung verbraucht.

8.3.2.3. Steilheit

Je steiler diese Kennlinie verläuft, um so stärker ändert sich der Anodenstrom I_a bei gleicher Veränderung der Gitterspannung U_g .

Man bezeichnet das Verhältnis von $\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ als „Steilheit“ S

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \left[\frac{\text{mA}}{\text{V}} \right]$$

einer Röhre (siehe Abb. 92).

Die Steilheit drückt aus, um wieviel mA sich der Anodenstrom ändert, wenn die Gitterspannung um 1 V verändert wird. Ihre Maßeinheit ist

entsprechend $\frac{\text{mA}}{\text{V}}$. Für die Praxis interessiert dabei nur die Steilheit im geradlinigen Verlauf der Kennlinie (sogenannter linearer Bereich). Die Steilheit ist ein wichtiges Merkmal für die Arbeitsweise der Röhre. Bei modernen Röhren erreicht man Röhrensteilheiten bis zu etwa $40 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$.

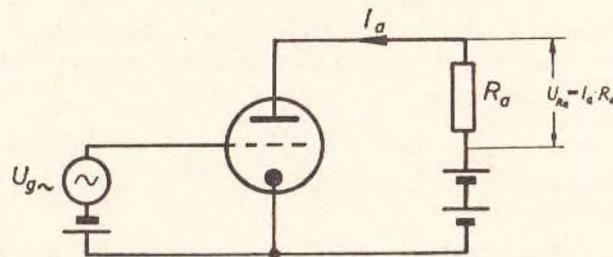
8.3.2.4. Verstärkerwirkung der Dreipolröhre

Schaltet man in den Anodenstromkreis einen Widerstand R_a und legt an das Steuergitter der Röhre eine Wechselspannung, so ist der Spannungsabfall am Widerstand R_a vom Anodenstrom I_a abhängig:

$$U_{Ra} = I_a \cdot R_a$$

Da sich der Anodenstrom I_a infolge der Steuerwirkung des Gitters verändert, schwankt die Spannung an R_a im gleichen Rhythmus. Die Wechselspannung an R_a ist dabei immer größer als die Steuerwechselspannung. Daher eignet sich die Röhre als Verstärker.

Die Triode als Verstärker



(Abb. 93)

Da durch eine geringe Gitterspannungsänderung eine große Spannungsänderung am Außenwiderstand R_a erzielt werden kann, wird die Dreipolröhre (Triode) als Verstärker verwendet.

Das Verhältnis von $\frac{\Delta U_{Ra}}{\Delta U_g}$ nennt man den **Verstärkungsfaktor** der Röhre.

$$v = \frac{\Delta U_{Ra}}{\Delta U_g}$$

Der Verstärkungsfaktor sagt aus, um wieviel Volt sich die Spannung an R_a ändert, wenn die Gitterspannung U_g um 1 Volt verändert wird.

Beispiel:

Einer Röhre mit der Steilheit $S = 5 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$ wird eine Gitterwechselspannung von 1 V zugeführt. R_a beträgt 10000Ω . Wie groß ist v ?

Lösung: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$

folglich $\Delta I_a = S \cdot \Delta U_g = 5 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 1 \text{ V} = 5 \text{ mA}$

Bei Änderung der Gitterspannung um 1 V ändert sich also der Anodenstrom um 5 mA.

Dabei beträgt die Spannungsänderung an R_a :

$$\Delta U_{Ra} = \Delta I_a \cdot \Delta R_a = 0,005 \text{ A} \cdot 10000 \Omega = 50 \text{ V.}$$

Der Verstärkungsfaktor beträgt demnach:

$$v = \frac{\Delta U_{Ra}}{\Delta U_g} = \frac{50 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 50$$

Die Röhre hat in der geg. Schaltung eine Verstärkung von 1 V auf 50 V, also 50fach.

Jede Röhre hat aufgrund ihrer Konstruktionsmerkmale einen bestimmten inneren Widerstand R_i . Zur Erzielung der **größten Verstärkerleistung** gilt auch bei der Wahl des Widerstandswertes für R_a :

$$R_a = R_i \text{ Röhre}$$

In der Praxis wird R_a jedoch im allgemeinen zur Herabsetzung der Verzerrungen größer gewählt als R_i der Röhre.

8.3.2.5. Verwendung der Röhre mit Steuergitter

Die Elektronenröhre mit Steuergitter findet in allen Gebieten der Elektrotechnik als Verstärkerröhre Verwendung:

- a) Verstärkung von Tonfrequenzen (Niederfrequenzverstärker) z. B. Fernsprechen, Tonbandgerät, Phonoverstärker.
- b) Verstärkung von Hochfrequenzen (Hochfrequenzverstärker) z. B. Trägerfrequenz-Fernsprechen, Rundfunk usw.

Daneben findet man sie z. B. als wichtiges Bauelement in Schaltungen zur Steuerung und Regelung (Rechenanlagen, automatische Steuerung von Maschinen usw.). Außer der Dreipolröhre gibt es heute für die verschiedensten Anwendungsgebiete eine Vielzahl von Röhrentypen mit bis zu sieben Gittern.

8.4. Die Bezeichnung von Elektronenröhren

Die verschiedenartigen Röhrentypen werden nach bestimmten Schlüsseln bezeichnet. Der Fachmann erkennt anhand der Bezeichnung Art und Verwendungszweck einer Röhre. Wir wollen hier den in Deutschland für Elektronenröhren allgemeiner Anwendungsbereiche (z. B. Rundfunk- und Fernsehempfänger, Phonogeräte usw.) üblichen Bezeichnungsschlüssel kennenlernen:

Die Röhrenbezeichnung setzt sich aus zwei oder mehr Buchstaben und einer angehängten Zifferngruppe zusammen. Der 1. Buchstabe gibt Aufschluß über die Art der Röhrenheizung, der 2. und weitere Buchstaben kennzeichnen das Röhrensystem. Die Zifferngruppe stellt eine Art Entwicklungs-Nr. dar. Sie läßt aber Rückschlüsse auf die Art des Röhrensockels zu.

An 1. Stelle		An 2., 3. und weiterer Stelle		
	Heizart		Röhrensystem	Anwendungsbeispiele
A	4 V \sim	A	Diode	HF-Gleichrichter
B	180 mA = --	B	Doppeldiode	HF-Gleichrichter
C	200 mA \cong	C	HF-/NF-Triode	Vorverstärker
D	1,2...1,4 V Batt. --	D	NF-Leistungstriode	Endverstärker
E	6,3 V \cong --	F	HF-/NF-Pentode (Fünfpölröhre)	Vorverstärker
K	2 V Batt.	H	Hexode (Sechspölröhre)	Mischröhre
P	300 mA \cong --	L	Leistungspentode	Endverstärker
U	100 mA \cong --	M	Anzeigeröhre (z. B. Mag. Band)	Abstimm- oder Aussteuerungsanzeige
V	50 mA \cong --	Y	Leistungsdiode	Netz- oder Hochspannungsgleichrichter
		Z	Leistungs-Doppeldiode	Netz-Zweiweggleichrichter

Zeichenerklärung:

\sim	Wechselstrom		Parallelschaltung der Heizfäden
=	Gleichstrom	--	Reihenschaltung der Heizfäden
\cong	Allstrom	HF	Hochfrequenz
Batt.	Batteriebetrieb	NF	Niederfrequenz (Tonfrequenz)

Die erste Ziffer gibt Aufschluß über den Röhrensockel:

9	Pico 7-Sockel (7 Stifte)
4	Pico 8-Sockel (8 Stifte)
8	Pico 9-Sockel (9 Stifte)
2	Pico 10-Sockel (10 Stifte)

Beispiel:

EABC 80 = Röhre mit 6,3 V Heizspannungsbedarf (E) und einer Diode (A), einer Doppeldiode (B), und einer Triode (C).
Der Röhrensockel hat 9 Anschlußstifte (80).

8.5. Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 8.1. bis 8.4.

1. Auf welche Arten kann eine Elektronenemission bewirkt werden? 2. Welche Bauarten der Röhrenheizung gibt es? 3. Welche Vor- und Nachteile haben die beiden Arten der Röhrenheizung? 4. Welche Eigenschaft hat eine Zweipölröhre und wofür wird sie verwendet? 5. Wie heißen die Elektroden einer Zweipölröhre? 6. Warum steigt in einer Zweipölröhre der Strom trotz Erhöhung der Spannung von einer bestimmten Grenze an nicht weiter? 7. Wodurch unterscheidet sich eine Dreipölröhre von einer Zweipölröhre? 8. Was geschieht, wenn man die Spannung am Steuergitter einer Dreipölröhre verändert? 9. Was versteht man unter dem Begriff Steilheit einer Röhre? 10. Woraus ergibt sich für eine Röhre der sog. Verstärkungsfaktor? 11. Warum wird zur Steuerung der Röhre keine Leistung verbraucht? 12. Für welche Zwecke wird die Dreipölröhre in der Fernmeldetechnik verwendet? 13. Eine Röhre trägt die Typenbezeichnung PCL 84. Um welche Art Röhre handelt es sich dabei?

Anhang
Elektrische Eigenschaften einiger Leitungsarten

Leitungsart	Leiter- durchmesser d mm	Leitungskennwerte			Dämpfungskennwert α' N km	Wellen- widerstand Z Ω	Grenzfrequenz f_0 Hz
		R' Ω km	C' nF km	L' mH km			
a) Freileitungen aus Bronze	1,5	31,4	5,1	2,3	0,017	675	—
	2	17,6	5,4	2,2	0,010	640	—
	3	5,3	6,0	2,0	0,005	580	—
b) unbespulte Kabeldoppeladern (Cu)	0,4	260	27,5	0,77	0,130	1 370	—
	0,6	130	31	0,7	0,100	920	—
	0,8	73,2	33	0,7	0,075	670	—
	0,9	57,8	34	0,7	0,070	580	—
	1,2	32,5	35	0,7	0,053	430	—
c) mittelschwer bespulte Kabeldoppeladern (Cu)	1,4	23,8	36	0,7	0,046	370	—
	0,8	65,7	33	0,7	0,025	1 640	3 580
	0,9	51,6	34	0,7	0,020	1 610	3 530
	1,2	29,2	35	0,7	0,013	1 590	3 470
	1,4	21,3	36	0,7	0,010	1 560	3 420
d) sehr leicht bespulte Kabeldoppeladern (Cu) für Rundfunkübertragung	0,9	51,6	34	0,7	0,024	1 230	4 650
	1,2	29,2	35	0,7	0,015	1 200	4 600
	1,4	14,6	36	0,7	0,012	1 170	4 500
	1,2	29,2	35	0,7	0,035	535	11 200
	1,4	21,3	36	0,7	0,026	500	11 100
	1,4	21,3	36	0,7	0,033	380	22 000

- Band C1** — **Werkstoffkunde und Werkstoffbearbeitung**
Werkstoffe der Fernmeldetechnik und ihre Bearbeitung — Werkzeuge und Werkzeugmaschinen — Werkstoffprüfung — Oberflächenschutz der Metalle — Nichtmetallische Werkstoffe — Isolierstoffe — Kunststoffe
- Band C2** — **Oberirdischer Linienbau**
FBG und FBZ im oberirdischen Linienbau — Planung und Bau oberirdischer Anschlußlinien — Installationskabel und Luftkabel — Erdungsanlagen
- Band C3** — **Unterirdischer Linienbau**
Gestaltung der Fernmeldenetze — Fernmeldekabel — Aufgaben und Aufbau der Bauteile im Anschlußnetz — Schaltungen in Verzweigungseinrichtungen — Druckluftprüfeinrichtungen
- Band C4** — **Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen**
Aufbau, Schaltung und Wirkungsweise der Fernsprechapparate und Zusatzeinrichtungen
- Band C5** — **Wählvermittlungstechnik**
(mit Beiheft) Grundzüge der Wählvermittlungstechnik — Bauelemente und ihre Verwendung — Gliederung und Aufbau der Ortsvermittlungen — Vorfeldeinrichtungen — Stromversorgungs- und Erdungsanlagen — Fernwählvermittlungsstellen
- Band C6** — **Nebenstellenanlagen**
(mit Beiheft) Zweck der Nebenstellenanlagen — Baustufen — Stromversorgung — Schaltungsaufbau der kleinen Nebenstellenanlagen und der Reihenanlagen
- Band C7** — **Sprechstellenbau**
Bauftrag — Einrichtungs- und Änderungsgebühren — Teilnehmer-einrichtungen — Fernmeldebauzeug — Bauausführung

Umfang je Band rund 140 Seiten

**Wichtig zur Vorbereitung
auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen**

Deutschlehre
(mit Beiheft)

Rechtschreibung — Wortlehre — Satzlehre — Zeichensetzung — Stil- und Aufsatzkunde — Übungsaufgaben — Übungsdiktate — Lösungen

Umfang rund 200 Seiten

Preis 5,— DM

Rechenlehre

Rechnen — Raumlehre — Sortenverwandlung — Übungsaufgaben — Angewandte Aufgaben — Lösungsheft

Umfang rund 190 Seiten

Preis 5,— DM

— Weitere Lehrbücher siehe 2. und 4. Umschlagseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Buchreihe BFt —

15

wichtige Lehr- und Lernwerke zur Vorbereitung auf den Grundlehrgang Ft 2, die verschiedenen Aufbaulehrgänge BFt und den Abschlußlehrgang BFt

Band G — Grundlagen der Fernmeldetechnik (2 Teile)

Band E — Entstörungstechnik (2 Teile)

Band L — Linientechnik (2 Teile)

Band V — Vermittlungstechnik (3 Teile)

Band T — Telegrafentechnik (2 Teile)

Band U — Übertragungstechnik (2 Teile)

Band Fu — Funktechnik (2 Teile)

Umfang je Band etwa 180 Seiten

Sonderband:

Allgemeines Prüfungswissen
(für die Kräfte des BFW-, BFt- und BPT-Dienstes)
(2 Teile)

Sämtliche Lehrwerke können bestellt werden bei

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag

6 Frankfurt 1 — Savignystraße 43