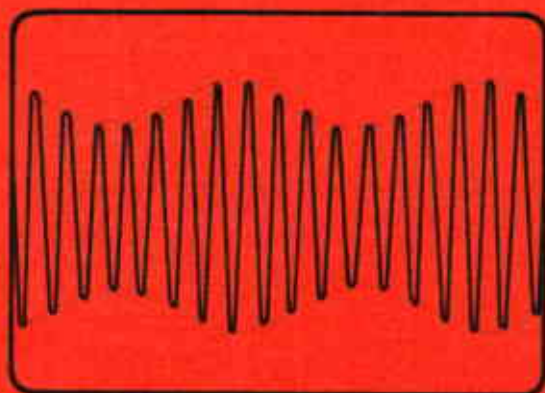

Handbuch

der

Fernmeldetechnik

Grundreihe



fernmeldelehrling.de

Band 9

Übertragungstechnik

Handbuch der Fernmeldetechnik

— Grundreihe —

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

Band 1 — Allgemeine Berufskunde

Berufsbildungsgesetz — Berufsausbildungsvertrag — Verordnung über die Berufsausbildung zum Fernmeldehandwerker — Jugendarbeitschutzgesetz — Dienstverhältnisse bei der DBP — Die Tätigkeitsbereiche und die beruflichen Entwicklungsmöglichkeiten des Fernmeldehandwerkers — Tarifvertrag für die Lehrlinge bei der DBP — Aufbau und Aufgaben der DBP — Organisation der Fernmeldeämter — Sozial-einrichtungen — Personalvertretung — Fernmelderecht — Besondere berufskundliche Themen — Schriftformen von Meldungen, Gesuchen und Prüfungsarbeiten — Staatsaufbau — Grundrechte und -pflichten des Staatsbürgers — Brandschutzanweisung

● Repetitor zum Band 1

Band 2 — Grundkenntnisse der Mathematik und der Physik (mit Lösungsheft)

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

● Repetitor zum Band 2

Band 3 — Grundlagen der Gleich- und Wechselstromlehre (2 Teile)

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

● Repetitor zum Band 3

Band 4 — Aufgabensammlung zu Band 3 (mit Lösungsheft)

— Weitere Lehrbücher siehe 3. und 4. Umschlagsseite —

Handbuch der Fernmeldetechnik

Grundreihe

Band 9

Übertragungstechnik

3., verbesserte Auflage

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

Vorwort

Das insgesamt 13 Bände umfassende „Handbuch der Fernmeldetechnik — Grundreihe“ soll den Auszubildenden während der gesamten Ausbildungszeit ein ständiger Begleiter sein und ihnen in möglichst enger Anlehnung an das in der „VO über die Berufsausbildung zum FHandw“ festgelegte Berufsbild eine umfassende und gute Prüfungsvorbereitung ermöglichen. Damit dieses Ziel erreicht wird, gehen wir von dem in dem Ausbildungsrahmenplan stichwortartig angegebenen Grundlernstoff aus, der dann schwerpunktmäßig in dem notwendigen Ausmaß ergänzt wird. Die Frage nach dem Wie, Warum und Wozu steht hierbei immer im Mittelpunkt der Überlegungen.

Der vorliegende Band „Übertragungstechnik“ führt in die Probleme der elektrischen Nachrichtenübertragung ein. Nach einem kurzen Überblick über die Grundlagen der Elektroakustik werden die gegenwärtig gebräuchlichen Verfahren zur elektrischen Übertragung von Fernsprechnachrichten dargestellt. Dabei werden zunächst die Eigenschaften von Fernmeldeleitungen und deren Auswirkungen auf die Sprachübertragung beschrieben, dann werden die NF-Verstärkertechnik und schließlich die TF-Technik behandelt. Ein kurzes Kapitel führt in die Grundlagen der Fernschreib- und Datenübertragungstechnik ein. Abschließend wird ein Überblick über die PCM-Technik gegeben, eine Form der Fernsprechübertragung, die künftig im Nahbereich eine große Rolle spielen wird.

Die Verfasser erheben nicht den Anspruch, daß die Bände alle Vorschriften und technischen Einzelheiten sowie auch das in der Praxis selten Vorkommende enthalten. Ihnen ging es vielmehr darum, ein Lehrbuch zu schaffen, das der gestellten Aufgabe ohne unnötigen Ballast im Interesse der Leser gerecht wird.

Wir hoffen, daß sich dieser aus der Praxis für die Praxis geschriebene Band sowohl während der Ausbildungszeit als auch darüber hinaus als Lern- und Nachschlagewerk bewähren wird.

Die Herausgeber

Stand: Frühjahr 1975

Nachdruck, auch auszugsweise, nicht gestattet.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Elektroakustik	
1.1. Das menschliche Ohr	7
1.1.1. Hörvermögen für Tonhöhen	7
1.1.2. Hörfläche	8
1.1.3. Lautstärke-Hörvermögen	9
1.2. Grundlagen der elektroakustischen Übertragung	11
2. Leitungstechnik	
2.1. Übertragung von Nachrichten	14
2.2. Fernmeldeleitungen und ihre Eigenschaften	15
2.2.1. Wirkwiderstand	16
2.2.2. Isolationswiderstand und Ableitung	16
2.2.3. Leitungsinduktivität	17
2.2.4. Leitungskapazität	17
2.2.5. Die vier Leitungskennwerte	18
2.2.6. Wellenwiderstand	20
2.3. Anpassung	22
2.4. Dämpfung	25
2.4.1. Leitungsdämpfung	25
2.4.2. Bezugsdämpfung	34
2.4.3. Maßnahmen zur Herabsetzung der Leitungsdämpfung	36
2.5. Übertragungsstörungen auf Fernmeldeleitungen	39
2.5.1. Dämpfungsverzerrungen	39
2.5.2. Nichtlineare Verzerrungen (Klirrverzerrungen)	40
2.5.3. Laufzeit	40
2.5.4. Laufzeitverzerrungen	41
2.5.5. Geräusche	41
2.6. Kopplungen	41
2.6.1. Galvanische Kopplungen	42
2.6.2. Kapazitive Kopplungen	42
2.6.3. Induktive Kopplungen	42
2.6.4. Beseitigung der Kopplungen	43
2.7. Phantomkreisbildung	47
3. Niederfrequenz-Verstärkertechnik	
3.1. Aufgaben eines Verstärkers	50
3.2. Pegel	52

	Seite
3.3. Arten von verstärkten NF-Leitungen	55
3.3.1. Zweidrahtleitung	55
3.3.2. Vierdrahtleitung	56
3.4. Bauteile eines NF-Verstärkers	57
3.4.1. Gabelschaltung	57
3.4.2. Entzerrer	59
3.4.3. Verstärker	59
3.5. Konstruktive Bauformen der NF-Verstärkereinrichtungen	60
3.6. NLT-Verstärker	62
4. Trägerfrequenztechnik	
4.1. Aufgabe der Trägerfrequenztechnik	64
4.2. Technik der Frequenzumsetzung	65
4.2.1. Darstellung von Schwingungen und Frequenzbändern	65
4.2.2. Die amplitudenmodulierte Schwingung	66
4.2.3. Der Modulationsvorgang	68
4.2.4. Der Demodulationsvorgang	72
4.2.5. Modulation mit dem Ringmodulator	73
4.2.6. Demodulation mit dem Ringmodulator	76
4.3. Bildung von TF-Systemen	77
4.3.1. Stufenweise Modulation	77
4.3.2. Endeinrichtungen	79
4.3.3. Übertragungswege	82
4.3.4. Betriebsarten der TF-Systeme	87
4.3.5. Übersicht über gebräuchliche TF-Systeme	90
5. Fernschreib- und Datenübertragungstechnik	
5.1. Analoge und digitale Nachrichtenübertragung	93
5.2. Bildung von Binärschritten	95
5.2.1. Binärzustände	95
5.2.2. Binärschritte	96
5.2.3. Maße für Binärschritte	97
5.3. Bildung von Telegrafierzeichen	99
5.3.1. Telegrafienalphabete	99
5.3.2. Start-Stop-Zeichen	100
5.3.3. Maße für die Übertragung von Telegrafierzeichen	101
5.4. Übertragung von Telegrafennachrichten und Daten	102
5.4.1. Übertragungsverfahren für Binärschritte	102
5.4.2. Wechselstromtelegrafie (WT)	103
5.4.3. Modems	104
6. PCM-Technik	106

Wichtige Abkürzungen in der Übertragungstechnik

A	Kennbuchstabe für Startpolarität
a	Formelzeichen für das Dämpfungsmaß
Bd	Baud
dB	Dezibel
FlÜ	Fernleitungsübertrager
FM	Frequenzmodulation
f _s	Frequenz der Signalschwingung (NF-Signal)
f _{Tr}	Frequenz der Trägerschwingung
KU	Kanalumsetzer
N	Newton
NF	Niederfrequenz...
NLT	Negative Leitung mit Transistoren
Np	Neper
p	Formelzeichen für den Pegel
p	Formelzeichen für den Schalldruck
PCM	Pulsmodulation
PGU	Primärgruppenumsetzer
s	Formelzeichen für das Verstärkungsmaß
SGU	Sekundärgruppenumsetzer
Sp	Stopschritt
St	Startschritt
SWFD	Selbstwählerndienst
TF	Trägerfrequenz...
T _s	Formelzeichen für die Schrittlänge
TÜSt	Telegrafienübertragungsstelle
TVSt	Telegrafienvermittlungsstelle
V	Vierdrahtübertragungssystem
v _s	Formelzeichen für die Schrittgeschwindigkeit
v _z	Formelzeichen für die Zeichengeschwindigkeit
WT	Wechselstromtelegrafie
Z	Kennbuchstabe für Stoppolarität
Z	Zweidrahtübertragungssystem
ZVr	Zwischenverstärker
α	Formelzeichen für den Dämpfungskennwert
4Dr	Vierdraht...
2Dr	Zweidraht...

1. Elektroakustik

Unter Akustik ist die Lehre vom Schall zu verstehen. Die Elektroakustik bezieht sich ausschließlich auf die Schallaufzeichnung, -übertragung und -wiedergabe mit Hilfe elektrischer Mittel.

1.1. Das menschliche Ohr

Bei der elektroakustischen Übertragung von Nachrichten (Sprache und Musik) muß sehr wesentlich auf die Eigenschaften des menschlichen Ohres Rücksicht genommen werden. Dabei ist neben der Tonhöhe (Frequenz) der **Schalldruck** einer akustischen Information von großer Bedeutung. Unter Schalldruck versteht man den durch eine Schallschwingung hervorgerufenen Wechseldruck je Flächeneinheit, also die Kraft, mit der 1 m² Membranfläche (z. B. eines Mikrofons oder des Trommelfells) bewegt wird. Zur gut hörbaren Schallübertragung ist eine nur verhältnismäßig geringe Kraftwirkung notwendig. So liegt der Schalldruck beim normallauten Sprechen in der Größenordnung von 1/100 N/m².

Größe	Formelzeichen	Name	Einheit
		Zeichen	
Schalldruck	p	Newton pro Quadratmeter	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Die Empfindlichkeit von Mikrofonen wird z. B. dadurch ausgedrückt, wie hoch die abgegebene Spannung bei Beschallung mit einem Schalldruck von 1 $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ist, z. B. 2,5 mV / $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$. Sinngemäß wird die Empfindlichkeit von Fernhörern durch das Verhältnis von abgegebenem Schalldruck zu angelegter Spannung angegeben, z. B. 2 $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ / V. Statt von Empfindlichkeit spricht man auch vom elektroakustischen Übertragungsfaktor.

1.1.1. Hörvermögen für Tonhöhen

Der größtmögliche Tonfrequenzbereich, den der Mensch wahrnehmen kann, geht von 16 Hz bis 20 000 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 Tonhöenschwankungen ist das Ohr verhältnismäßig empfindlich. So werden z. B. im Bereich oberhalb 500 Hz Tonhöenschwankungen 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 (Hi-Fi-Geräte) besser als 0,3% sein. Bei Studioplattenspiellern erreicht man heute Gleichlaufgenauigkeiten von etwa 0,1%.

1.1.2. 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 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, weil dabei die größte Meßgenauigkeit (z. B. in Meßbrücken mit Kopfhörern als „Nullinstrument“) erreicht wird.

Wird der Schalldruck bei gleichbleibendem 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 (vgl. hierzu Abb. 1.1).

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.

Auf dieser Erkenntnis beruht die gehörrichtige Lautstärkeregelung, die bei allen modernen Rundfunkgeräten und Verstärkern angewandt wird. Dabei werden Höhen und Tiefen um so stärker angehoben, je leiser die Wiedergabe eingestellt wird (vgl. Kurven 50 phon und 0 phon in Abb. 1.1).

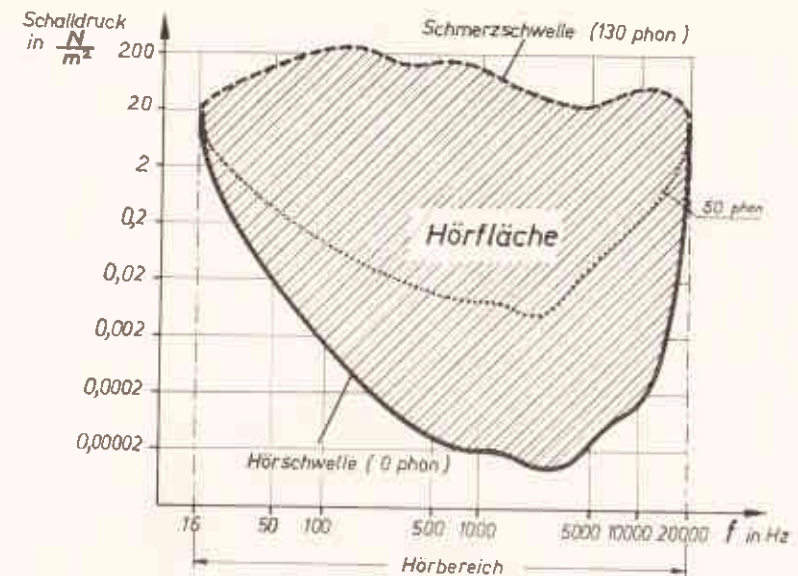


Abb. 1.1 — Hörfläche

1.1.3. 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

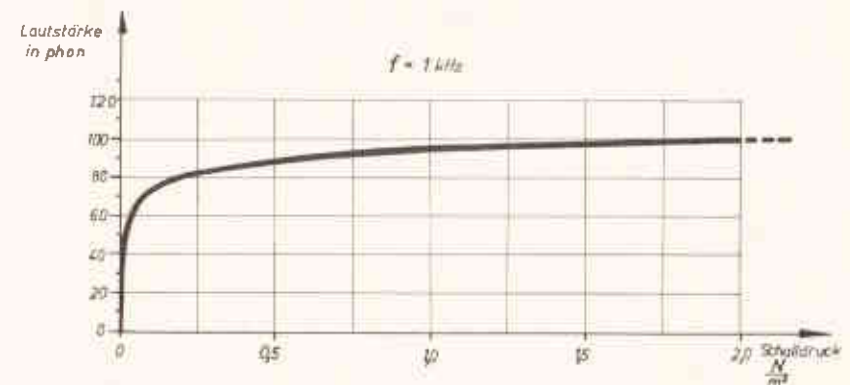


Abb. 1.2 — Die logarithmische Abhängigkeit der Lautstärke vom Schalldruck

mathematische Begriff Logarithmus nicht allgemein bekannt sein dürfte, wollen wir versuchen, das Hörvermögen für die Lautstärke anhand eines logarithmischen Diagramms zu erklären. Abb. 1.2 zeigt die Abhängigkeit der Lautstärke vom Schalldruck.

Aus dem Diagramm ergibt sich:

- wird der Schalldruck oberhalb der Hörschwelle gesteigert, 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.

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

Bei Annäherung an die Schmerzschwelle wird eine Verdopplung des Schalldrucks kaum, eine Verzehnfachung des Schalldrucks gerade als Lautstärkeänderung empfunden. Soll also beispielsweise in einem Konferenz- oder Tanzsaal die Lautstärke einer Lautsprecherübertragung deutlich erhöht werden, so sind dazu Verstärker mit sehr großer Leistungsreserve nötig.

Das logarithmische Lautstärkeempfinden des menschlichen Ohres wird in der Maßeinheit der Lautstärke — phon — berücksichtigt. Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, daß die Lautstärke (der sog. Schallpegel) nach der Formel

$$A = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \text{ phon}$$

berechnet werden kann, wenn man für p den tatsächlichen Schalldruck und für p_0 den Schalldruck an der Hörschwelle in $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ einsetzt.

Größe	Formelzeichen	Einheit
Lautstärke	A	phon

Der Empfindungsbereich für die Lautstärke liegt zwischen 0 phon (Hörschwelle) und 130 phon (Schmerzschwelle). 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 normale Verständigung benötigt ein Fernhörer eine elektrische Leistung von ca. 0,1 mW (50 phon).

Die Verständlichkeit einer Schallinformation wird nicht etwa — wie man annehmen könnte — mit zunehmendem Schalldruck besser, sondern erreicht bei einer bestimmten Höhe den günstigsten Wert. Steigt der Schalldruck weiter, so verringert sich die Verständlichkeit. Daher darf z. B. beim Fernsprechen der vom Fernhörer abgegebene Schalldruck im Interesse einer guten Verständlichkeit nicht zu groß werden.

1.2. Grundlagen der elektroakustischen 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.

Für die Übertragung von Musik wäre ein Frequenzband von 20 Hz bis 18 000 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. Werden bei einer Musikübertragung die hohen Frequenzen beschnitten, so kann man unter Umständen eine Violine nicht mehr von einer Flöte unterscheiden.

Ähnlich ist es bei der Sprache. Ihr Tonfrequenzbereich liegt etwa zwischen 80 Hz und 10 000 Hz. An bestimmten Oberschwingungen, die die Klangfarbe beeinflussen, ist der Sprecher häufig zu 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 (Musikübertragung) und
Verständlichkeit (Fernsprechen).**

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es jedoch nicht möglich, immer das vollständige Frequenzband zu übertragen. So werden je nach Anforderung die Frequenzbereiche oben und unten beschnitten. Eine

Begrenzung des Frequenzbandes für die Übertragung von Musik auf 30 bis 15 000 Hz läßt gegenüber der Originaldarbietung kaum einen Unterschied erkennen. Im Tonleitungsnetz der Bundespost wird für Rundfunkdarbietungen (Musik) dieses Frequenzband übertragen.

Anders liegen die Verhältnisse bei der Übertragung von Sprache (Fernsprechen). 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 als bei der Ton-Rundfunkübertragung 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.

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	fliz	gors	hirs	pram	sim	ver
straf	kic	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 möglichst das volle Frequenzband der Musikinstrumente wiedergegeben werden. Dazu ist ein breites Frequenzband von ca. 30 bis 15 000 Hz erforderlich. Man fordert Natürlichkeit. Beim Fernsprechen genügt ein Frequenzband von 300 bis 3400 Hz der Anforderung Verständlichkeit vollauf.

2. Leitungstechnik

2.1. 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**.

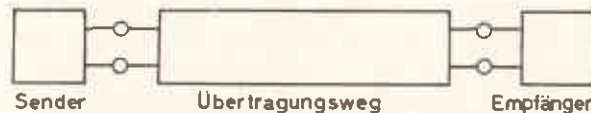


Abb. 2.1 — Schema einer Fernmeldeanlage

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 (Nachrichtenübertragung über Kabel- bzw. Freileitungen), elektromagnetische Energie (Funktechnik) und Lichtenergie (Laserstrahlen). Wir wollen uns hier nur mit Kabel- bzw. Freileitungen als Übertragungsweg beschäftigen. Beim Empfänger müssen dann die Nachrichten in die ursprüngliche Form zurückverwandelt werden. Beim Fernsprechen wird als Sender beispielsweise ein Mikrofon verwandt, in dem der Schall in elektrische Energie umgewandelt wird; als Empfänger dient der Fernhörer, der die elektrische Energie wieder in Schall zurückwandelt.

Es leuchtet wohl ein, daß mit konstantem Gleichstrom keine Nachrichten übermittelt werden können. Konstanter Gleichstrom enthält ja keinerlei Aussage. Erst wenn man den Gleichstrom in Form von verabredeten Zeichen unterbricht oder entsprechende Gleichstromstöße oder Gleichstrom-Amplitudenschwankungen 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.: Mikrofon im unbesprochenen Zustand: Es fließt ein Speisegleichstrom = keine Nachricht. Wird das Mikrofon 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.

Je nach Art der Nachricht werden verschiedene Anforderungen in bezug auf die Übertragungsgüte und den Frequenzbereich gestellt. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Nachrichtenarten in der Fernmeldetechnik.

Tabelle 2.1: Nachrichtenarten in der Fernmeldetechnik

Nachrichtenart	allgemeine Anforderung	erforderlicher Frequenzbereich
Fernschreiben im Telex-Netz	Zeichentreue (Lesbarkeit)	0 40 Hz
Fernsprechen	Verständlichkeit	300 3 400 Hz
Rundfunkübertragung	Natürlichkeit	30 15 000 Hz
Fernsehübertragung	Bildschärfe (25 Bilder je Sekunde) (625-Zeilenbild)	0 5 MHz
Datenübertragung	Zeichentreue	abhängig von der Geschwindigkeit der Datenübertragung

2.2. Fernmeldeleitungen und ihre Eigenschaften

Von der **Bauart** her wird unterschieden zwischen

- a) **Freileitungen** = blanke Fernmeldeleitungen, die an oberirdischem Gestänge verlaufen und
- b) **Kabelleitungen** = mit Isolation umhüllte Fernmeldeleitungen, die meistens in unterirdisch verlegten, seltener in freitragenden Kabeln verlaufen.

Der Einsatz von Freileitungen ist im Laufe der Jahre sehr stark zurückgegangen; sie werden gegenwärtig nur noch in ländlichen Gegenden mit geringer Teilnehmerdichte betrieben. Das Leitungsnetz der Deutschen Bundespost wird im wesentlichen durch Kabelleitungen gebildet.

¹ Beeinflussung

2.2.1. Wirkwiderstand

Der Wirkwiderstand einer Drahtleitung hängt nach der Formel

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

ab von dem spezifischen Widerstand ρ des Leitermaterials, der gesamten Leiterlänge l und dem Querschnitt A des Leiters. Außerdem hat die Temperatur einen Einfluß auf den Leitungswiderstand. Der Temperatureinfluß kann — vor allem bei langen Fernmeldeleitungen und bei der Kabelfehler-Meßtechnik — nicht unberücksichtigt bleiben.

Daneben wirkt sich bei sehr hohen 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 höherfrequente Wechselströme praktisch nur noch in der Außenhaut des Leiters, während der Leiterkern stromlos ist (was einer Querschnittsverminderung gleichzusetzen ist).

Bei Betrieb der Leitungen im Bereich der Sprachfrequenzen (NF-Bereich) spielt der Skineffekt keine Rolle. Bei TF-Leitungen kann der Skineffekt allerdings schon sehr bedeutend sein. TF-Leitungen haben beispielsweise bei 100 kHz einen 2,5fach höheren Wirkwiderstand als bei Gleichstrom.

2.2.2. Isolationswiderstand und Ableitung

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

Der Isolationswiderstand stellt einen „Querwiderstand“ dar, der zwischen Hin- und Rückleitung liegt. Um die durch den Isolationswiderstand auftretenden Verluste in Grenzen zu halten, hat man Mindestwerte festgelegt. Zum Beispiel soll der Isolationswiderstand

- a) für **Freileitungen** (Doppelleitungen):
 - bei trockenem Wetter 1 M Ω · km,
 - bei feuchtem Wetter 0,5 M Ω · km,
- b) für **Kabel-doppeladern** 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 Isolationswiderstands an. Dieser Kehrwert wird als **Ableitung** bezeichnet. 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 Fernsprechleitungen ist eine Bezugsfrequenz von 800 Hz zugrunde gelegt, bei der die Isolationswiderstandsmessungen durchgeführt werden.

2.2.3. 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. Die Maßeinheit für die Leitungsinduktivität ist Henry bzw. Millihenry.

2.2.4. Leitungskapazität

Die beiden parallellaufenden Drähte einer Doppelleitung bilden die Beläge eines Kondensators. Seine Kapazität hängt außer von der Länge der Doppelleitung vom

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

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

Isoliermaterial aus Kunststoff besitzt aber Dielektrizitätszahlen etwa zwischen 3 und 5. Damit würde die Leitungskapazität in Kabel-doppeladern durch zwei Größen unerwünscht erhöht, nämlich den geringen Abstand der Adern und die hohe Dielektrizitätszahl 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.

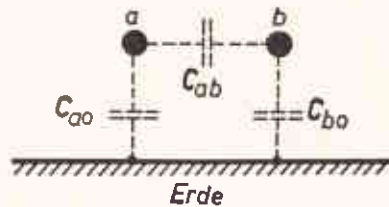
Um die Leitungskapazität einer Kabel-doppelleitung so gering wie möglich zu halten, wird in Kabeln meistens eine Papier-Luft-Isolierung angewendet.

Dabei wird die Kupferader mit einem Papierband umwickelt, das von einer Papierkordel auf Abstand gehalten wird. Damit ist ein großer Teil des Zwischenraums mit Luft aufgefüllt (niedrige Dielektrizitätszahl). Aus der Kombination Luft-Papier ergibt sich für die Dielektrizitätszahl ein Mittelwert von etwa 1,6.

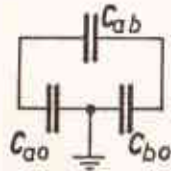
Bei der Berechnung der sog. **Betriebskapazität** muß man berücksichtigen, daß die Leiter einer Doppelleitung neben der Kapazität zueinander auch noch eine Kapazität gegen Erde oder andere benachbarte Leiter (z. B. auch gegen den Kabelmantel) besitzen. Als einfaches Beispiel wählen wir eine Freileitung:

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

$$C = C_{ab} + \frac{C_o}{2}$$



Ersatzschaltbild:



$$C = C_{ab} + \frac{C_{ao} \cdot C_{bo}}{C_{ao} + C_{bo}} = C_{ab} + \frac{1}{2} C_o$$

Abb. 2.2 — Beispiel für die Bestimmung der Betriebskapazität

2.2.5. Die vier Leitungskennwerte

Die Eigenschaften der Fernmeldeleitungen werden durch den Wirkwiderstand, die Ableitung, die Induktivität und die Kapazität bestimmt. Um verschiedene Leitungen miteinander vergleichen zu können, bezieht man die genannten Größen stets auf eine Leitungslänge von 1 km (Doppelleitung) und bezeichnet sie als **Leitungskennwerte**. Zur Verdeutlichung, daß es sich um kilometrische Werte handelt, erhalten die entsprechenden Formelzeichen einen zusätzlichen Strich.

Größe	Formelzeichen	Einheit	
		Name	Zeichen
Widerstandskennwert	R'	Ohm pro Kilometer	$\frac{\Omega}{\text{km}}$
Ableitungskennwert	G'	Mikrosiemens pro Kilometer	$\frac{\mu\text{S}}{\text{km}}$
Induktivitätskennwert	L'	Millihenry pro Kilometer	$\frac{\text{mH}}{\text{km}}$
Kapazitätskennwert	C'	Nanofarad pro Kilometer	$\frac{\text{nF}}{\text{km}}$

Damit man einen Überblick über die Größenordnungen bekommt, sind in der Tabelle 2.2 die Leitungskennwerte einiger in den Fernsprechnetzen häufig verwendeter Leitungsarten (Kupferadern) zusammengestellt.

Tabelle 2.2: Leitungskennwerte

ϕ mm	R' $\frac{\Omega}{\text{km}}$	G' $\frac{\mu\text{S}}{\text{km}}$	L' $\frac{\text{mH}}{\text{km}}$	C' $\frac{\text{nF}}{\text{km}}$
0,4	267,5	< 0,1	0,7	34,0
0,6	119,2	< 0,1	0,7	36,7
0,8	66,7	< 0,1	0,7	37,2

Aus den vier Leitungskennwerten läßt sich das in Abb. 2.3 dargestellte Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung zeichnen. In solch einem Ersatzschaltbild sind die Grundgrößen, die sich in Wirklichkeit gleichmäßig entlang der Fernmeldeleitung verteilen, zu elektrischen Bauelementen zusammengefaßt.

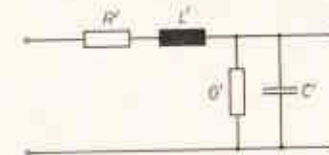


Abb. 2.3 — Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung

Wir erkennen, daß sich die Ersatzschaltung einer Fernmeldeleitung aus zwei Wirkgrößen (R' und G') und aus zwei Blindgrößen (L' und C') zusammensetzt. Anhand der in Tabelle 2.2 aufgeführten Zahlenwerte wollen wir nun die Größen im Ersatzschaltbild miteinander vergleichen. Wir betrachten die Leitung mit 0,4 mm Aderndurchmesser und legen eine mittlere Sprachfrequenz von 800 Hz zugrunde. Es zeigt sich, daß der Wirkwiderstand ($267,5 \Omega$) wesentlich größer ist als der induktive Blindwiderstand ($X_L = \omega \cdot L = 2 \pi \cdot 800 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} = 3,5 \Omega$). Desgleichen ist der kapazitive Blindleitwert wesentlich größer als die Ableitung ($Y_C = \omega \cdot C = 2 \pi \cdot 800 \cdot 34 \cdot 10^{-9} = 170 \mu\text{S}$). Wir machen demnach keinen allzu großen Fehler, wenn wir die Auswirkungen der Größen G' und L' vernachlässigen. Für den Sprachfrequenzbereich läßt sich demnach das folgende vereinfachte Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung zeichnen.

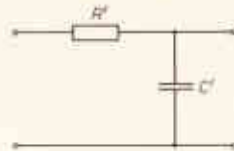


Abb. 2.4 — Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung
(Tonfrequenzbereich)

Das vereinfachte Ersatzschaltbild läßt sich also aus einer Kette von R-C-Gliedern verwirklichen. Mit dieser Schaltung lassen sich Fernmeldeleitungen, die im Tonfrequenzbereich betrieben werden, verhältnismäßig gut nachbilden, zum Beispiel, um das elektrische Verhalten experimentell nachzuverfolgen.

2.2.6. Wellenwiderstand

Legt man an den Anfang einer Fernmeldeleitung eine sinusförmige Wechselspannung von beispielsweise 800 Hz an, so fließt ein bestimmter Wechselstrom, dessen Größe von den vier Leitungskennwerten und dem Leitungsabschluß abhängt. In der Abb. 2.5 sind die Effektivwerte der Spannungen und Ströme in das Ersatzschaltbild eines kleinen Teilstücks einer Fernmeldeleitung eingezeichnet. Am Ende des Teilstücks ist die Spannung U_2 kleiner als die Spannung U_1 am Anfang des Teilstücks. Ursache für den Spannungsverlust sind der ohmsche Spannungsabfall am Wirkwiderstand und die durch die Leitungsinduktivität induzierte Gegenspannung. Aber auch die Stromstärke I_2 ist am Ende des Leitungsteilstücks kleiner als die Stromstärke I_1 am Anfang. Verantwortlich für die Änderung der Stromstärke sind der dielektrische Verschiebungsfluß über die Leitungskapazität sowie der Ableitstrom über den Isolationswiderstand.

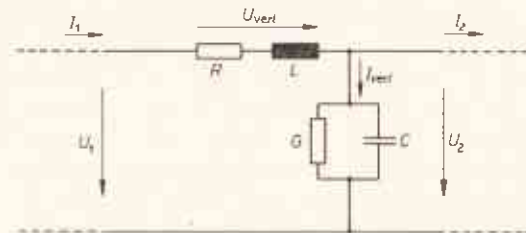


Abb. 2.5 — Spannungen und Ströme an einem kleinen Teilstück einer Fernmeldeleitung

Die Fernmeldeleitung, von der wir in Abb. 2.5 ein kleines Teilstück betrachtet haben, soll an ihrem Ende mit einem Widerstand abgeschlossen sein, der den Leitungseigenschaften entspricht (stoßfreier

Abschluß, vgl. Abschn. 2.3). In diesem Fall ist an jedem beliebigen Punkt der Leitung, also am Anfang, in der Mitte oder am Ende, das Verhältnis aus Spannung und Strom gleich. Dabei spielt die Länge der Leitung keine Rolle. Natürlich nehmen die Beträge von Strom und Spannung im Verlauf einer beispielsweise 100 km langen Fernmeldeleitung sehr stark ab, aber das Verhältnis dieser beiden Werte bleibt doch an allen Stellen konstant.

Nach dem ohmschen Gesetz wird das Verhältnis von Spannung und Strom durch einen Widerstand festgelegt. Bei einer Fernmeldeleitung wird dieser Widerstand **Wellenwiderstand Z** genannt. Wie jeder andere Widerstand wird auch der Wellenwiderstand in Ω angegeben. Da das Spannungs-Strom-Verhältnis längs beliebig langer Leitungen stets gleich bleibt, ist auch der Wellenwiderstand unabhängig von der Leitungslänge. Er wird allein durch die Größe der vier Leitungskennwerte bestimmt. Da die vier Leitungskennwerte Wirk- und Blindgrößen sind, ist der Wellenwiderstand Z ein Scheinwiderstand. Seine Größe ist somit frequenzabhängig. Bei höheren Frequenzen (über 100 kHz) ist er jedoch nahezu konstant.

Der Wellenwiderstand läßt sich aus den Leitungskennwerten berechnen. Bei Leitungen, die im Tonfrequenzbereich betrieben werden, kann man im allgemeinen die Leitungsinduktivität und die Ableitung vernachlässigen. Für den Betrag des Wellenwiderstands gilt dann folgende Näherungsformel:

$$Z = \sqrt{\frac{R'}{\omega \cdot C'}} \quad \Omega$$

Für Leitungen, die bei höheren Frequenzen betrieben werden (z. B. Trägerfrequenzleitungen), errechnet sich der Wellenwiderstand dagegen nach folgender Formel:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \Omega$$

Beispiele:

- a) Wie groß ist der Wellenwiderstand einer Doppelleitung mit 0,8 mm Adern-durchmesser bei 800 Hz?

Lösung:

Nach Tabelle 2.2 ist $R' = 66,7 \frac{\Omega}{\text{km}}$ und $C' = 37,2 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$.

Dann ist

$$Z = \sqrt{\frac{R'}{\omega \cdot C'}} = \sqrt{\frac{66,7}{2 \pi \cdot 800 \cdot 37,2 \cdot 10^{-9}}} = 598 \quad \Omega$$

Der Wellenwiderstand beträgt rechnerisch 598 Ω . Tatsächlich gemessen werden 590 Ω . Wir sehen also, daß die verwendete Näherungsformel einigermaßen genau ist.

b) Wie groß ist der Wellenwiderstand dieser Leitung bei 100 kHz?

Lösung:

Nach Tabelle 2.2 ist $L' = 0,7 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$. Dann ist

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{37,2 \cdot 10^{-9}}} = 137 \Omega$$

Der Wellenwiderstand beträgt rechnerisch 137Ω . Tatsächlich werden 132Ω gemessen.

Wir fassen zusammen:

Jede Fernmeldeleitung besitzt einen Wellenwiderstand. Er wird bestimmt durch die vier Leitungskennwerte und ist unabhängig von der Leitungslänge. Er ist bei tiefen Frequenzen stark frequenzabhängig, nimmt mit steigender Frequenz ab und ist bei hohen Frequenzen nahezu konstant.

2.3. Anpassung

Zur Erklärung des Begriffs Anpassung wollen wir zunächst eine Schaltung betrachten, die aus einer Stromquelle mit der Leerlaufspannung $U_0 = 60 \text{ V}$ sowie dem inneren Widerstand $R_i = 600 \Omega$ und einem veränderbaren Belastungswiderstand R_a besteht (vgl. Abb. 2.6).

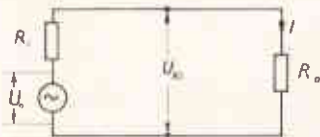


Abb. 2.6 — Stromkreis zur Ableitung des Begriffs Anpassung

Der Belastungswiderstand soll verschiedene, bestimmte Widerstandswerte erhalten. Für jeden Belastungsfall werden die Klemmenspannung U_{Kl} , der Strom I und die vom Belastungswiderstand R_a aufgenommene elektrische Leistung P_a berechnet.

Die Rechnung stellen wir in Tabellenform zusammen:

U_0 V	R_i Ω	R_a Ω	$R_a : R_i$	$I = \frac{U_0}{R_i + R_a}$ A	$U_{Kl} = I \cdot R_a$ V	$P_a = U_{Kl} \cdot I$ W
60	600	0	0 : 1	0,1	0	0
60	600	200	1 : 3	0,075	15	1,125
60	600	400	2 : 3	0,06	24	1,44
60	600	600	1 : 1	0,05	30	1,5
60	600	1200	2 : 1	0,0333	40	1,33
60	600	1800	3 : 1	0,025	45	1,125
60	600	∞	$\infty : 1$	0	60	0

Das Anpassungsdiagramm in Abb. 2.7 ist anhand der errechneten Tabellenwerte gezeichnet worden.

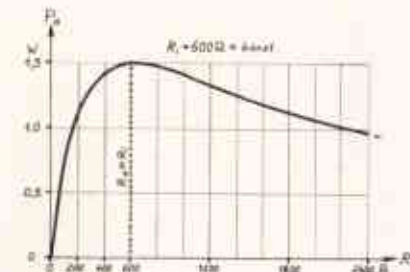


Abb. 2.7 — Anpassungsdiagramm

Daraus kann gefolgert werden:

Die Leistungsabgabe einer elektrischen Energiequelle an einen Verbraucher ist dann am größten, wenn der Verbraucherwiderstand R_a genauso groß ist wie der innere Widerstand R_i der Energiequelle. Dieser Sonderfall in einem elektrischen Stromkreis wird als **Anpassung** bezeichnet.

Da bei der Nachrichtenübertragung mit Wechselströmen gearbeitet wird, müssen in der Fernmeldetechnik Wechselstromwiderstände betrachtet werden. Ein Empfänger ist beispielsweise dann richtig an die ankommende Fernmeldeleitung angepaßt, wenn sein Scheinwiderstand mit dem Wellenwiderstand der Leitung übereinstimmt. Andererseits ist ein Sender richtig an eine abgehende Fernmeldeleitung angepaßt, wenn sein Innenwiderstand mit dem Wellenwiderstand der Leitung übereinstimmt. In allen Fällen muß natürlich die Bezugsfrequenz berücksichtigt werden, z. B. 800 Hz bei Tonfrequenzbetrieb.

Das Anpassungsdiagramm läßt aber auch erkennen, daß sich eine Überanpassung ($R_a > R_i$) nicht so nachteilig auf die abgegebene Leistung auswirkt wie eine Unteranpassung ($R_a < R_i$). Deshalb sollte im Zweifelsfall R_a etwas größer als R_i gewählt werden.

In der Fernmeldetechnik wird zur Nachrichtenübertragung nur sehr geringe elektrische Energie aufgewendet. Ein Fernhörer benötigt beispielsweise 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 Übertragungsweges (Fernmeldeleitung) kann es zu Schwierigkeiten kommen, wenn zwei Leitungen mit verschiedenen

Wellenwiderständen miteinander verbunden werden müssen, oder wenn der Sender einen anderen Wellenwiderstand aufweist als der Empfänger.

Beim einfachen Zusammenschalten würden sich hier 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. 2.8 — Veranschaulichung der Fehlanpassung

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 Verhinderung solcher Stoßstellen (= stoßfreier Übergang) 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 Primärscheinwiderstand des Übertragers übereinstimmt. Auf diese Weise wird durch den Übertrager wieder das richtige Verhältnis von Spannung zu Strom hergestellt.

Anpassungsübertrager finden wir z. B. am Eingang bzw. am Ausgang von Verstärkern, wo sie die Aufgabe haben, den Verstärkerinnenwiderstand an den Wellenwiderstand der Fernmeldeleitung anzupassen.

Für die Anpassung zweier Fernmeldeleitungen mit verschiedenen Wellenwiderständen werden **Fernleitungsübertrager** (FIÜ) verwendet, deren Wirkungsweise in Abb. 2.9 veranschaulicht wird. Solche FIÜ können allerdings nur dort eingesetzt werden, wo die Schaltkennzeichen der Vermittlungstechnik (z. B. Wahlimpulse) als Wechselstromzeichen übertragen werden. Meist werden sog. Niederfrequenz-Fernverbindungskabel (NFFVvk), über die die Verbindungsleitungen

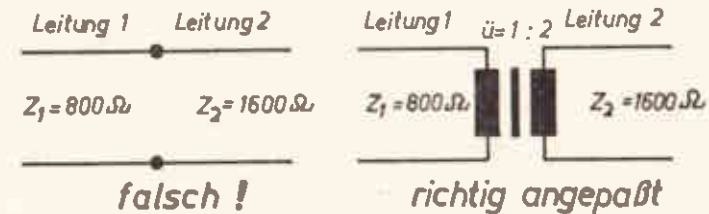


Abb. 2.9 — Anpassung von Fernmeldeleitungen

in der unteren Ebene des SWFD-Netzes geführt sind, mit FIÜ abgeschlossen. In diesem Fall haben die FIÜ nicht nur die Aufgabe der Anpassung, sondern sie dienen auch zur Phantomkreisbildung (vgl. Abschn. 2.7).

In den Fernsprechnetzen lassen sich FIÜ gewöhnlich nicht einsetzen, weil hier die Schaltkennzeichen meist als Gleichstromzeichen übertragen werden. Solche Leitungen dürfen nicht durch Übertrager abgeriegelt werden. Auch im Ortskabelnetz können Stoßstellen entstehen, beispielsweise wenn eine 0,4-mm-Doppelader ($Z = 1255 \Omega$) mit einer 0,6-mm-Doppelader ($Z = 810 \Omega$) zusammengeschaltet wird. Die Energieverluste an diesen Stoßstellen spielen aber bei Ortsverbindungen meist keine große Rolle.

2.4. Dämpfung

2.4.1. Leitungsdämpfung

Wir wollen an die Betrachtungen anknüpfen, die wir im Abschn. 2.2.6 über den Wellenwiderstand einer Fernmeldeleitung gemacht haben. Anhand der Abb. 2.5 haben wir dabei festgestellt, daß am Ende eines kleinen Leitungsteilstücks sowohl die Spannung als auch der Strom etwas kleiner sind als am Anfang des Leitungsteilstücks. Diese Verringerung von Spannung und Strom erfolgt, vom Leitungsanfang aus, Teilstück für Teilstück entlang der gesamten Fernmeldeleitung, so daß am Leitungsende Spannung und Strom stets geringer sind als am Leitungsanfang. Die Gründe dafür haben wir im Abschn. 2.2.6 aufgezeigt.

Wir wissen, daß das Produkt aus Spannung und Strom ein Maß für die elektrische Energie ist (= elektrische Leistung). Wenn Spannung und Strom entlang einer Fernmeldeleitung immer kleiner werden, dann muß folglich elektrische Energie verlorengehen: Die am Leitungsanfang eingespeiste Nachricht kommt am Leitungsende mit

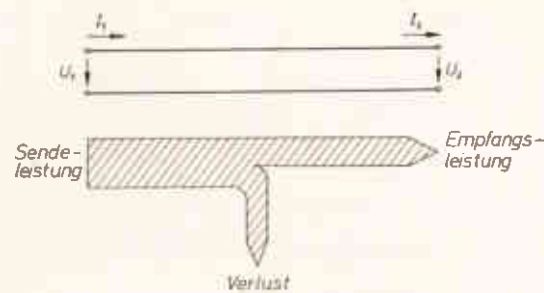


Abb. 2.10 — Leistungsverhältnisse bei einer Fernmeldeleitung

verringerten Leistung an. Die verlorengegangene Leistung wird in den Kupferadern und in der Leitungsisolation in Wärme umgesetzt. Abb. 2.10 veranschaulicht die Leistungsverhältnisse bei einer Fernmeldeleitung. Der Leistungsverlust längs einer Fernmeldeleitung wird als **Dämpfung** bezeichnet.

Die Leistung, mit der eine Nachricht am Anfang der Leitung eingespeist wird, nimmt mit zunehmender Leitungslänge nicht linear ab. Die zahlenmäßigen Beträge des Leistungsverlustes werden vielmehr immer kleiner. Mathematisch ausgedrückt sagt man, die Leistung nimmt logarithmisch ab.

Wir wollen versuchen, die logarithmische Leistungsabnahme längs einer Fernmeldeleitung durch ein Gedankenexperiment zu erläutern. Dabei wollen wir anstelle der Leistung die Spannung betrachten, was prinzipiell zum gleichen Ergebnis führt. Wir gehen dabei von dem vollständigen Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung aus (vgl. Abb. 2.3). Bei unserem Gedankenexperiment machen wir nun im einzelnen folgende Schritte:

- 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 Widerstände X_L und X_C .
- Sowohl die Widerstände, die in Reihe im Leitungszug liegen (R und X_L), als auch die Widerstände, die parallel zwischen den Einzelleitern liegen ($\frac{1}{G}$ und X_C), werden je zu einem Gesamtwiderstand Z_{RL} und Z_{CG} zusammengefaßt (Abb. 2.11 a).
- Damit können wir ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen kleinen Abschnitt der Fernmeldeleitung aus den beiden Scheinwiderständen Z_{RL} und Z_{CG} darstellen (Abb. 2.11 b).
- Wenn wir jetzt dieses vereinfachte Schaltbild wie in Abb. 2.11 c darstellen, erhalten wir eine einfache Spannungsteilerschaltung (Potentiometer).
- Für eine Fernmeldeleitung ergibt sich damit eine Kettenschaltung aus Spannungsteilern.

Aufgrund der Kettenschaltung aus Spannungsteilern sinkt die Spannung im Verlauf einer Fernmeldeleitung nicht gleichmäßig ab. Mit zunehmender

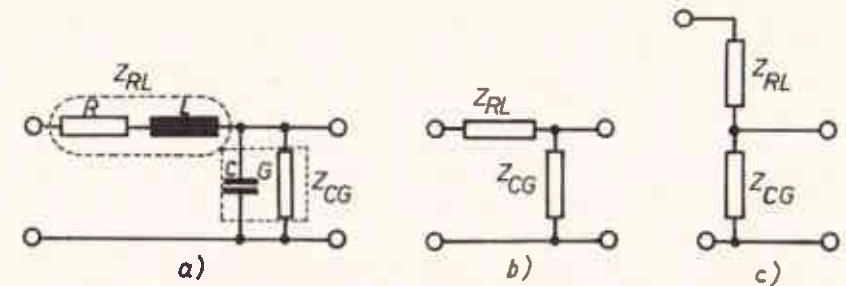


Abb. 2.11 — Ersatzschaltbilder für einen kurzen Leitungsabschnitt

Leitungslänge nimmt die Spannung nach einer logarithmischen¹ Funktion ab. Nehmen wir einmal an, daß sich die Widerstände Z_{RL} zu Z_{CG} wie 9:1 verhalten. Bei einer Kettenschaltung aus mehreren Spannungsteilern 9:1 und einer Eingangsspannung von 1 Volt würde die Spannung nach dem ersten Kettenglied (Spannungsteiler) auf 1/10 V, nach dem zweiten auf 1/100 V und nach dem dritten auf 1/1000 V gesunken sein. Wir sehen, daß auf dem ersten Teilstück der Leitung 0,9 V Spannung abfallen, auf dem zweiten Teilstück nur 0,09 V und auf dem dritten Teilstück schließlich nur noch 0,009 V. Die Spannung nimmt also nicht linear ab; sie nimmt vielmehr vom Anfang der Leitung aus zunächst schnell, dann aber immer langsamer ab. Die Sprünge können wir auch in Zehnerpotenzen ausdrücken. Dann hat das erste Kettenglied die Spannung auf $1:10^1$, das zweite Kettenglied auf $1:10^2$ und das dritte Kettenglied auf $1:10^3$ der Eingangsspannung herabgesetzt. Bei dieser Betrachtungsweise sehen wir sofort die entscheidende Vereinfachung der Rechnung: Wir brauchen nur noch die Hochzahlen zur Basis 10 zu betrachten.

Das vorstehende Gedankenexperiment läßt sich gut durch praktische Versuche ergänzen. Wir bauen uns dazu eine künstliche Fernmeldeleitung aus einer Kettenschaltung von 15 R-C-Gliedern ($R = 100 \Omega$, $C = 22 \text{ nF}$). An den Anfang dieser Leitung legen wir eine Wechselspannungsquelle, die bei einer Frequenz von 800 Hz $U_0 = 2 \text{ V}$ einspeist. Das Ende der Leitung schließen wir mit 600Ω

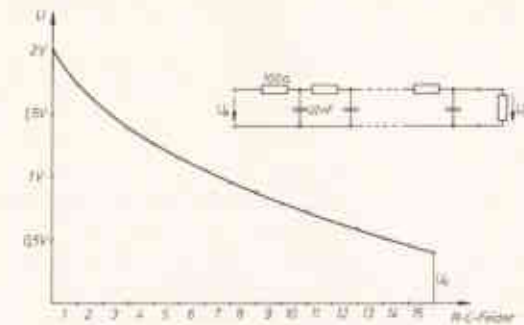


Abb. 2.12 — Logarithmische Spannungsabnahme längs einer Fernmeldeleitung

¹ Logarithmus = mathematischer Begriff. Er bedeutet soviel wie Hochzahl oder Exponent. (Logarithmenrechnung ist eine Umkehrung der Potenzrechnung und ist im Prinzip ein Rechnen mit Hochzahlen.)

ab. Nun messen wir hinter jedem einzelnen R-C-Glied die Spannung und tragen sie in ein Koordinatensystem ein. In Abb. 2.12 ist der Spannungsverlauf längs unserer künstlichen Leitung aufgezeichnet. Wir erkennen deutlich die nicht-lineare Abnahme der Spannung.

Um die Dämpfung von Fernmeldeleitungen rechnerisch erfassen zu können, hat man das **Dämpfungsmaß** a eingeführt. Die Einheit des Dämpfungsmaßes ist das **Bel**¹. Eine Leitung hat die Dämpfung von 1 Bel, wenn die Leistung am Ende auf $1 : 10^1$ der Leistung am Anfang der Leitung abgesunken ist, also auf ein Zehntel. Entsprechend hat eine Leitung die Dämpfung von 2 Bel, wenn die Leistung auf $1 : 10^2$, also auf ein Hundertstel abgesunken ist, usw. Aus praktischen Gründen rechnet man aber nicht direkt in Bel, sondern mit dem zehnten Teil davon, dem **Dezibel (dB)**; es sind 10 Dezibel = 1 Bel.

Meistens vergleichen wir aber nicht Leistungen, sondern Spannungen miteinander, denn im praktischen Betrieb lassen sich Spannungen leichter messen als Leistungen. Hierzu ein kleines Rechenbeispiel. Nehmen wir an, daß eine Leitung eine Dämpfung von 20 dB (= 2 Bel) hat. Dann ist das Leistungsverhältnis:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{10^2}$$

Entsprechend ist das Spannungsverhältnis:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{U_2^2}{R_2}}{\frac{U_1^2}{R_1}} = \frac{1}{10^2}$$

Wir können nun die Vereinfachung machen, daß der Eingangswiderstand R_1 gleich dem Ausgangswiderstand R_2 ist, weil in der Fernmeldetechnik stets versucht wird anzupassen. Dann ergibt die weitere Rechnung:

$$\frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{1}{10^2} \quad \text{und nach Wurzelziehen auf beiden Seiten der Gleichung}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{10^1}$$

Wir stellen also fest, daß eine Leitung das Dämpfungsmaß 20 dB hat, wenn die Spannung am Ausgang der Leitung auf $1 : 10^1$ des Werts am Eingang abgesunken ist. Entsprechend hat die Leitung den Dämpfungswert 40 dB, wenn die Spannung auf den Wert $1 : 10^2$ abgesunken ist. Es soll aber klar festgehalten werden, daß eine Fernmeldeleitung nur einen bestimmten Dämpfungswert hat, ausgedrückt in dB. Aus diesem Dämpfungswert errechnen sich jedoch verschiedene Spannungs- und Leistungsverhältnisse.

¹ Bel bzw. Dezibel sind keine Maßeinheiten im physikalischen Sinn; sie geben dimensionslose Größenverhältnisse an.

Größe

Formelzeichen

Einheit

Dämpfungsmaß

 a

Name

Zeichen

Dezibel

dB

Die Dämpfung in dB kann nach folgenden Formeln errechnet werden:

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

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

In diesen Formeln bedeuten:

U_1 = Spannung am Eingang (Leistungsanfang),

U_2 = Spannung am Ausgang (Leitungsende),

P_1 = Leistung am Eingang (Leistungsanfang),

P_2 = Leistung am Ausgang (Leitungsende).

Um die komplizierte Rechnung mit den vorstehenden Formeln zu vermeiden, ist im Diagramm Abb. 2.13 der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung bzw. Eingangs- und Ausgangsleistung und dem Dämpfungsmaß grafisch dargestellt. Da dieser Zusammenhang auf dem Logarithmus beruht, ist die senkrechte Achse des Diagramms logarithmisch unterteilt. Dieser kleine Kunstgriff ermöglicht es, die Dämpfungskurve als Gerade zu zeichnen. Die Darstellung als Gerade darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß die zunehmende Dämpfungssteigerung um wenige dB bereits einen beträchtlichen Leistungs- bzw. Spannungsverlust bedeutet.

Beispiele:

- a) Wie groß ist die Dämpfung einer Fernmeldeleitung, wenn die Spannung am Leitungsende auf die Hälfte des Eingangswerts abgesunken ist?

Lösung:

Das Spannungsverhältnis beträgt:

$$\frac{U_1}{U_2} = 2 : 1$$

Dieses Spannungsverhältnis suchen wir auf der senkrechten Achse des Diagramms in Abb. 2.13 auf (dort bei „2“). Wir gehen nach rechts bis zur Dämpfungskurve, von dort nach unten und lesen auf der waagerechten Achse das Dämpfungsmaß ab. Es beträgt: $a = 6$ dB.

- b) Eine Fernmeldeleitung hat ein Dämpfungsmaß von 18 dB. Um wieviel kleiner ist die Ausgangsspannung als die Eingangsspannung?

Lösung:

Wir gehen genau umgekehrt vor wie in Aufgabe a). Zu 18 dB finden wir folgendes Spannungsverhältnis auf der senkrechten Achse:

$$\frac{U_1}{U_2} = 8 : 1$$

Die Spannung wird folglich auf ein Achtel des Eingangswerts herabgesetzt. Aus Beispiel a) können wir eine wichtige Faustformel entnehmen, die im praktischen Betrieb oft recht nützlich ist: **Eine Halbierung der Spannung entspricht einer Dämpfung von 6 dB.**

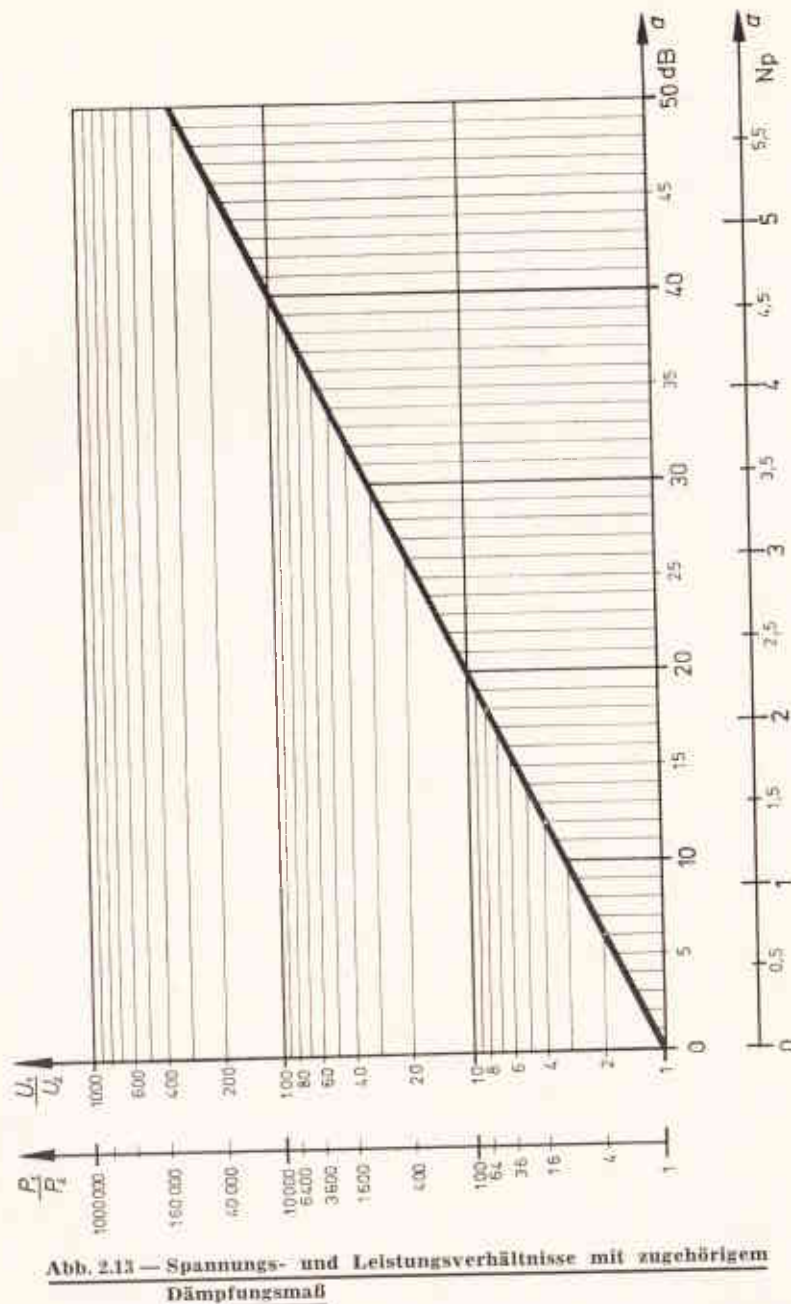


Abb. 2.13 — Spannungs- und Leistungsverhältnisse mit zugehörigem Dämpfungsmaß

Das Diagramm in Abb. 2.13 kann nicht nur zur Dämpfungsberechnung, sondern im gleichen Maß auch zur Verstärkungsberechnung oder zur Pegelberechnung herangezogen werden, denn auch dabei handelt es sich um das logarithmisch ausgedrückte Spannungs- oder Leistungsverhältnis (vgl. Abschn. 3).

Für die Dämpfung wurde etwa bis Herbst 1969 die Einheit Neper (Np) verwendet. Dabei wurde das Spannungsverhältnis nicht durch Zehnerpotenzen, sondern in Potenzen zur Zahl e (2,718...) angegeben. Auch gegenwärtig sind noch eine Reihe von Geräten in Betrieb, bei denen Angaben in Neper benutzt werden, z. B. NF-Verstärker. Die Umrechnung von Neper in Dezibel bzw. umgekehrt läßt sich sehr einfach nach folgenden Formeln durchführen:

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

Das Diagramm in Abb. 2.13 enthält zusätzlich zur dB-Skala auch noch eine Np-Skala.

Ebenso wie die vier Leitungskennwerte einer Fernmeldeleitung wird auch ihre Dämpfung auf 1 km Doppelleitung bezogen und als Dämpfungskennwert bezeichnet.

Größe	Formelzeichen	Einheit	
		Name	Zeichen
Dämpfungskennwert	α	Dezibel pro Kilometer	$\frac{\text{dB}}{\text{km}}$

Als Überblick sind in der Tabelle 2.3 die Dämpfungskennwerte häufig verwendeter Fernmeldeleitungen zusammengestellt.

Tabelle 2.3: Dämpfungskennwerte bei 800 Hz

ϕ	mm	0,4	0,6	0,8
α	$\frac{\text{dB}}{\text{km}}$	1,31	0,90	0,67

Anhand des Dämpfungskennwerts ist leicht die Gesamtdämpfung einer bestimmten Leitung zu errechnen:

$$a = \alpha \cdot l$$

In dieser Formel ergibt sich a in dB, wenn α in $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$ und l in km eingesetzt werden.

Der Vorteil der logarithmischen Dämpfungsberechnung besteht darin, daß die Gesamtdämpfung eines zusammengesetzten Übertragungs-

weges (z. B. mehrerer Leitungsabschnitte) durch einfache Addition der einzelnen Dämpfungen bestimmt werden kann.

Als Formel gilt:

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

Beispiel:

Wie groß ist die Dämpfung einer 12 km langen Fernmeldeleitung mit 0,8 mm Aderndurchmesser?

Lösung:

Nach Tabelle 2.3 beträgt der Dämpfungskennwert $\alpha = 0,67 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$. Damit ist $a = \alpha \cdot l = 0,67 \cdot 12 \approx 8 \text{ dB}$.

Wir wollen nochmals auf das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung (Abb. 2.4) zurückkommen, wobei wir jetzt das Dämpfungsverhalten bei verschiedenen Frequenzen untersuchen wollen. Die Leitungskapazität stellt einen quer zu den beiden Adern der Leitung liegenden Blindwiderstand dar. Dieser nimmt mit zunehmender Frequenz ab, denn $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$. Je kleiner aber dieser Quer-

widerstand ist, desto mehr Nachrichtenenergie fließt über die Leitungskapazität zum Sender zurück. Damit wird die beim Empfänger eintreffende Nutzenergie mit zunehmender Frequenz immer geringer, d. h., die Dämpfung wird größer. In Abb. 2.14 ist der frequenzabhängige Dämpfungsverlauf am Beispiel einer papierisolierten Doppelleitung mit 0,8 mm Aderndurchmesser dargestellt.

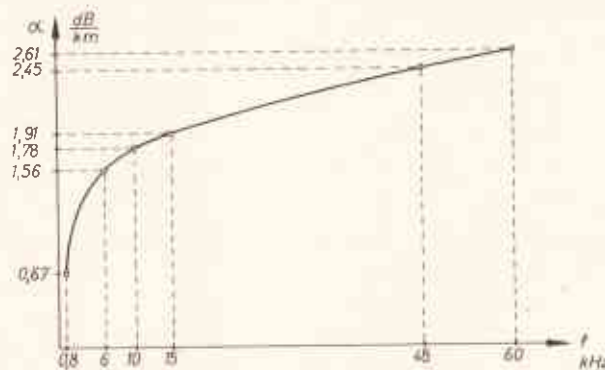


Abb. 2.14 — Frequenzabhängiger Dämpfungsverlauf einer Doppelleitung ($\phi = 0,8 \text{ mm}$)

Der Dämpfungskennwert muß wegen der Frequenzabhängigkeit der Dämpfung immer auf eine bestimmte Frequenz bezogen werden. Bei

Fernmeldeleitungen, die im Tonfrequenzbereich betrieben werden, ist die Bezugsfrequenz gewöhnlich 800 Hz.

Wie wir in dem vorgenannten Beispiel gesehen haben, können wir eine Fernmeldeleitung auch als Tiefpaß ansehen. Ein Tiefpaß ist eine Schaltung, die tiefe Frequenzen wenig gedämpft passieren läßt, während sie hohe Frequenzen stark dämpft. Ein Tiefpaß läßt sich folglich durch eine Zusammenschaltung eines Widerstands mit einem Kondensator bilden, wie in Abb. 2.15 dargestellt. Die Grenzfrequenz

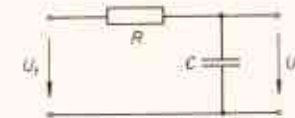


Abb. 2.15 — Einfacher Tiefpaß

f_0 eines solchen Tiefpasses ist die Frequenz, bei der die Ausgangsspannung U_2 auf das 0,7fache der Eingangsspannung U_1 abgesunken ist. Diese Grenzfrequenz läßt sich errechnen nach der Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \text{ Hz}$$

Beispiel:

Welche Grenzfrequenz f_0 hat ein R-C-Tiefpaß mit den Werten $R = 100 \Omega$ und $C = 2 \mu\text{F}$?

$$\text{Lösung: } f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \approx 800 \text{ Hz.}$$

Durch Umkehrung der Bauelemente läßt sich ein Hochpaß schaffen (vgl. Abb. 2.16). Ein Hochpaß hat die Eigenschaft, tiefe Frequenzen stark zu dämpfen und hohe Frequenzen verhältnismäßig wenig gedämpft passieren zu lassen. Die Grenzfrequenz eines Hochpasses läßt sich nach der gleichen Formel wie für den Tiefpaß angeben berechnen.

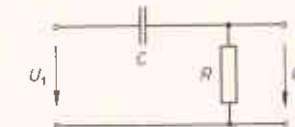


Abb. 2.16 — Einfacher Hochpaß

Natürlich sind die in den Abb. 2.15 und 2.16 dargestellten Tief- und Hochpaßschaltungen in der Übertragungstechnik nur sehr beschränkt brauchbar, weil der Dämpfungsanstieg jenseits der Grenzfrequenz verhältnismäßig flach verläuft. Im praktischen Betrieb sind daher die Widerstände meist durch Spulen ersetzt. Die hier angegebenen Schaltungen lassen sich jedoch sehr einfach bauen und lassen auch experimentell gut die Tief- bzw. Hochpaßwirkung erkennen.

2.4.2. Bezugsdämpfung

Um bei einer Fernsprechverbindung eine einwandfreie Übertragungsgüte zu haben, müssen die empfangenen Nachrichten im Fernhörer mit ausreichender Lautstärke wiedergegeben werden. Diese hängt zum einen von der Größe der Leitungsdämpfung der Verbindung ab; je größer die Leitungsdämpfung, desto geringer die Lautstärke. Zum anderen spielen aber auch die Empfindlichkeiten von Sprech- und Hörkapsel eine wesentliche Rolle dabei. Bei der Beurteilung der Übertragungsgüte einer Fernsprechverbindung muß man daher neben der Leitungsdämpfung auch die Eigenschaften der Kapseln mit einbeziehen. Um einen geeigneten Maßstab für die Übertragungsgüte eines elektroakustischen Übertragungssystems zu bekommen, wurde daher ein Fernsprech-Ureichkreis mit genau festgelegten Eigenschaften geschaffen. Durch Lautstärkevergleich mit diesem Ureichkreis läßt sich die Güte einer Fernsprechverbindung beurteilen. Das dazu eingeführte Maß heißt **Bezugsdämpfung** und wird in dB angegeben. Ein positiver Bezugsdämpfungswert (z. B. + 25 dB) bedeutet, daß eine geringere Lautstärke im Fernhörer wiedergegeben wird als beim Ureichkreis.

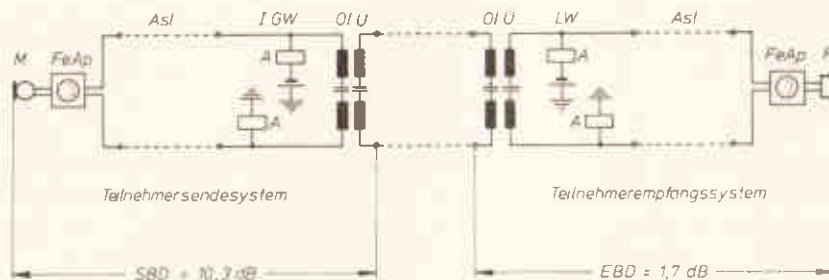


Abb. 2.17 — Sende- und Empfangsbezugsdämpfung

Wie Abb. 2.17 zeigt, besteht eine Fernsprechwahlverbindung grundsätzlich aus folgenden drei Abschnitten:

- Teilnehmer-Sendesystem mit Fernsprechapparat (einschließlich Mikrophon), Anschlußleitung und Speisebrücke im I. GW,
- Teilnehmer-Empfangssystem mit Speisebrücke im LW, Anschlußleitung und Fernsprechapparat (einschließlich Fernhörer),
- Verbindung zwischen I. GW und LW mit allen Wahlstufen und Verbindungsleitungen zwischen den Vermittlungsstellen.

Die gesamte Bezugsdämpfung, die eine Fernsprechverbindung hat, ist eine Addition der einzelnen Dämpfungen dieser drei Abschnitte:

Sendebezugsdämpfung (SBD) des Teilnehmer-Sendesystems, **Dämpfung der Verbindungsleitungen** und **Empfangsbezugsdämpfung (EBD)** des Teilnehmer-Empfangssystems.

Um bei allen Fernsprechanschlüssen ungefähr gleiche Übertragungsverhältnisse zu bekommen, sind die Sendebezugsdämpfung einheitlich auf + 10,3 dB und die Empfangsbezugsdämpfung auf + 1,7 dB festgelegt. Zur Messung dieser Werte gibt es Bezugsdämpfungsmeßplätze. Da es aber unmöglich ist, bei allen Fernsprechanschlüssen solche Messungen durchzuführen, muß man einen anderen, einfacheren Weg beschreiten. Sende- und Empfangsbezugsdämpfungen hängen zum einen vom Schleifenwiderstand der jeweiligen Anschlußleitung ab: je höher der Schleifenwiderstand, desto größer auch die Bezugsdämpfung. Zum anderen spielen die Empfindlichkeiten der Sprech- und Hörkapseln eine Rolle: je geringer die Empfindlichkeit, desto höher die Bezugsdämpfung. Bei der Inbetriebnahme eines Fernsprechanschlusses macht man eine Schleifenwiderstandsmessung der Anschlußleitung und bestimmt in Abhängigkeit von dem ermittelten Ohmwert die Empfindlichkeit der Kapseln (Kapselgruppen). Der Widerstand der Anschlußleitung und eine daran angepaßte Empfindlichkeit der Kapseln bringen also bei jedem Fernsprechanschluß ungefähr gleiche Sende- und Empfangsbezugsdämpfungswerte.

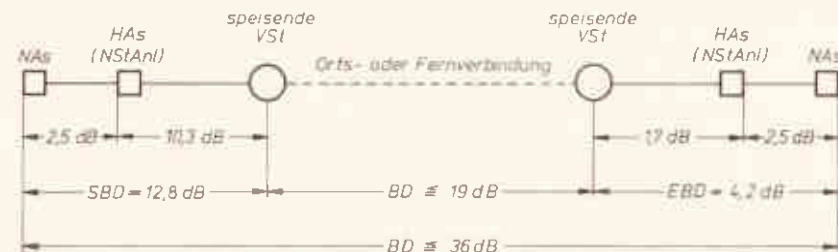


Abb. 2.18 — Auszug aus dem Dämpfungsplan 55

Die gesamte Bezugsdämpfung, die eine Fernsprechverbindung höchstens haben darf, beträgt 36 dB. Die Aufteilung dieses Werts auf die einzelnen Abschnitte einer Verbindung ist in Dämpfungsplänen geregelt. Für das öffentliche Fernsprechnet der DBP gilt der **Dämpfungsplan 55**, aus dem die wichtigsten Angaben in Abb. 2.18 festgehalten sind. Danach dürfen die Verbindungsleitungen zwischen den speisenden Vermittlungsstellen einschließlich aller technischen Einrichtungen höchstens mit 19 dB an der Gesamtbezugsdämpfung beteiligt sein. Zwischen zwei Hauptanschlüssen darf maximal eine Bezugsdämpfung von 31 dB herrschen. Bei Verbindungen von und zu Nebenstellen darf zusätzlich noch eine Bezugsdämpfung von 2,5 dB je Nebenanschlußleitung hinzukommen.

Diese genaue Aufteilung der Gesamtdämpfung auf die einzelnen Teile einer Fernsprechverbindung hat den Sinn, daß unabhängig von der jeweiligen Entfernung bei allen Verbindungen in etwa gleiche Übertragungseigenschaften herrschen sollen. Eine Verbindung im Nahbereich soll die gleiche Qualität aufweisen wie eine Verbindung zwischen Sprechstellen, die 1000 km voneinander entfernt sind. Aufgabe der Übertragungstechnik ist es, durch die verschiedensten Maßnahmen den Forderungen des Dämpfungsplans 55 Rechnung zu tragen.

2.4.3. Maßnahmen zur Herabsetzung der Leitungsdämpfung

Wie wir im Abschn. 2.4.2 gesehen haben, darf die Dämpfung der Verbindungsleitungen zwischen den speisenden Vermittlungsstellen höchstens 19 dB betragen. Dieser Wert ist durch einfache Kabeldoppeladern nur bei verhältnismäßig kurzen Verbindungsleitungen einzuhalten. Bei längeren Leitungen müssen besondere Maßnahmen zur Dämpfungsherabsetzung getroffen werden. Dazu gehört zum einen der Einsatz von Verstärkern, den wir im Abschnitt 3 noch behandeln werden. Zum anderen lassen sich auch gewisse Erfolge durch Beeinflussung der vier Leitungskennwerte erzielen. Hiermit wollen wir uns in diesem Abschnitt näher befassen.

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 Einzeileitungen voneinander (geringer Kapazitätskennwert). Zum Vergleich zwischen einer Kabelleitung und einer Freileitung dient folgendes Diagramm:

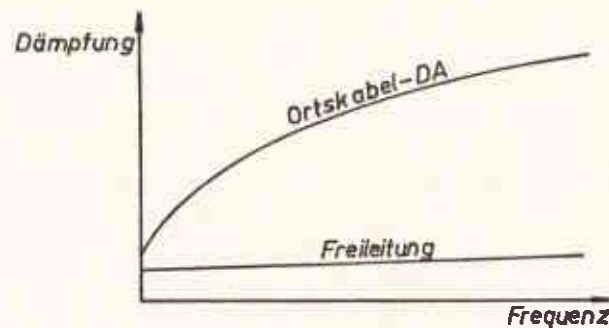


Abb. 2.19 — Dämpfungsverlauf in einer Kabel- und einer Freileitung

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 würden 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. Induktivität und Kapazität verursachen eine entgegengesetzte (180°) Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. Das hat zur Folge, 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 erfolgt 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 eingeschleift (vgl. Abb. 2.20).

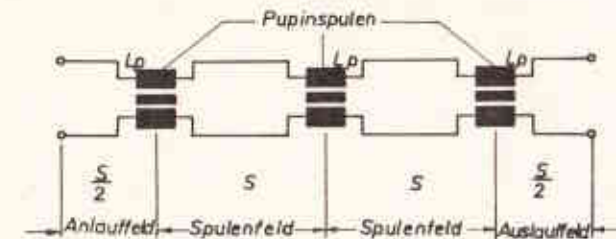


Abb. 2.20 — Bespulungsschema für eine Kabelstrecke

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 pupinisierten Kabel (Fernverkehr) gleichmäßig auf die Gesamtstrecke verteilen, werden Anlauf- und Auslauf Feld halb so lang gemacht wie ein Spulenfeld, also $\frac{s}{2}$.

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

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 . Daraus ergibt sich also, daß der mögliche Übertragungsbereich für eine bespulte Leitung für hohe Frequenzen um so geringer wird, je größer die Spuleninduktivität ist.

Die Grenzfrequenz kann nach der Formel

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

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, werden kleinere Induktivitäten in kürzeren Abständen in die Leitung eingesetzt.

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

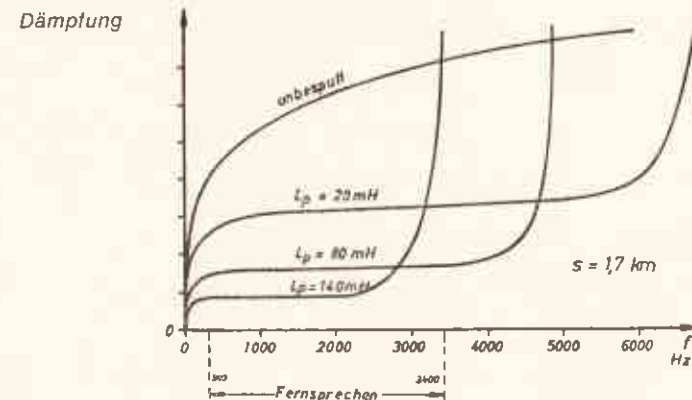


Abb. 2.21 — Einfluß der Bepulung auf Dämpfung und Grenzfrequenz

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.

Gegenwärtig sind vorwiegend Pupinspulen mit Induktivitäten von 80 mH und 40 mH gebräuchlich. Für Ton-Rundfunkleitungen, die ein breiteres Übertragungsfrequenzband benötigen und bei denen folglich die Grenzfrequenz höher liegen muß, werden Spulen mit einer Induktivität von 3,2 mH eingesetzt.

Die Pupinspulen werden heute ausschließlich als Lackdrahtspulen mit Ferrit- bzw. Masseisenkern hergestellt. Alle Spulen, die an einer Stelle (Spulenpunkt) in ein Kabel eingeschaltet werden sollen, werden in einen Spulenkasten eingebaut. Der Spulenkasten enthält also eine jeweils der Doppeladernzahl entsprechende Zahl an Spulen. Eine Vergußmasse schützt die Spulen gegen Feuchtigkeit.

Wir fassen zusammen:

Durch das Einschalten von Induktivitäten (Pupinspulen) in eine Kabelleitung wird die Auswirkung der Leitungskapazität und damit die Dämpfung herabgesetzt. Gleichzeitig erhält die Leitung eine obere Grenzfrequenz, oberhalb der keine Nachrichtenübermittlung mehr möglich ist.

2.5. Übertragungsstörungen auf Fernmeldeleitungen

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

2.5.1. 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 können durch Entzerrer ausgeglichen werden, die in jedem NF- und TF-Verstärker eingebaut sind.

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

2.5.2. Nichtlineare Verzerrungen (Klirrverzerrungen)

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 das Klangbild bei der Übertragung von Musik und Sprache, die Wiedergabe klingt „rau“ oder wie ein Klirren. Darum werden diese Verzerrungen auch Klirrverzerrungen genannt. Zur Beurteilung eines Übertragungsweges hinsichtlich der Klirrverzerrungen 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. Klirrverzerrungen werden durch Bauteile mit sogenannter gekrümmter Kennlinie (nichtlinearer Kennlinie) verursacht. Solche Bauteile sind z. B. Spulen oder Übertrager mit Eisenkernen (Hysteresis), Verstärkerröhren, Transistoren und Gleichrichterdiolen. 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. durch Gegenkopplungen oder geringe Aussteuerung der Verstärker) verhindern.

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

2.5.3. 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 als Beispiel an, zwischen Deutschland und Australien bestände eine stark bespulte Kabelleitung. 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 aufliegen. Heutzutage werden solche Entfernungen natürlich nicht durch Kabel-, sondern durch Satellitenfunkverbindungen überbrückt, bei denen die Laufzeit verschwindend gering ist.

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

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

Die Laufzeit läßt sich durch schwächere Bespaltung einer Kabelleitung herabsetzen.

2.5.4. 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 unterschiedlichen Laufzeiten für tiefe und hohe Frequenzen.

Tiefe Frequenzen haben eine geringe, hohe Frequenzen eine größere Laufzeit. Laufzeitverzerrungen lassen sich durch entsprechende Laufzeitentzerrer beseitigen.

2.5.5. Geräusche

Ein Ferngespräch kann außerdem durch verschiedene Geräusche gestört werden:

- a) Raumgeräusche im Mikrofon 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.

2.6. Kopplungen

Innerhalb eines Kabels liegen die Leitungen verhältnismäßig dicht nebeneinander. Hierdurch kann eine gegenseitige Beeinflussung der

Leitungen auftreten, d. h., Nachrichten können auf Nachbarleitungen mitgehört werden, was natürlich unerwünscht ist. 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.

2.6.1. 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.

2.6.2. 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.

2.6.3. 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 Wechselspannung induziert. Diese Induktionsspannung ist um so größer, je mehr Feldlinien der ersten Leiterschleife die benachbarte Leiterschleife durchsetzen. Die induktive Kopplung kann mit der Wirkungsweise eines Transformators ohne Eisenkern verglichen werden.

2.6.4. 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 (vgl. hierzu Abschn. 2.7) als **Mitsprechen** bezeichnet. Abb. 2.22 veranschaulicht den Vorgang des unerwünschten Übersprechens; in dem gezeichneten Beispiel handelt es sich um sog. Nahnebensprechen.



Abb. 2.22 — Übersprechen

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.

2.6.4.1. 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 Mitsprechen 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. Bei Fernmeldekabeln ist zu unterscheiden zwischen:

- a) **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.

b) Verseilung: 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. Durch die Verseilung wird erreicht, 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 oberirdische Linien nicht mehr gibt.

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

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

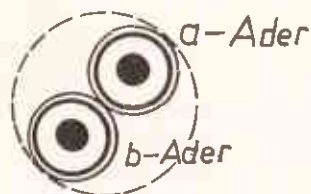


Abb. 2.23 — Paarverseilung

Bei der **Paarverseilung** werden zwei Adern zu einem Paar verseilt. Paarverseilte Leitungen werden gegenwärtig nur für besondere Zwecke eingesetzt, z. B. für die Übertragung von Ton-Rundfunknachrichten auf sog. Modulationsleitungen.

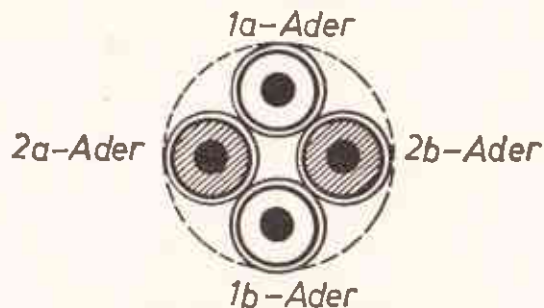


Abb. 2.24 — Sternverseilung

Im **Sternviererseil** liegen vier Einzeladern vollkommen symmetrisch zueinander und werden als ganze Einheit verseilt. Sternverseilte Leitungen werden hauptsächlich in den Fernsprechnetzen zur Schaltung von Anschlußleitungen und Ortsverbindungsleitungen eingesetzt.

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 Niederfrequenz-Fernverbindungskabel (NFFV) eingesetzt, also in der Fernebene. Dabei können sie mit und ohne Verstärker betrieben werden.

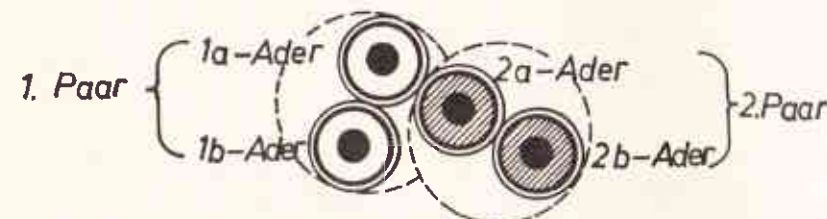


Abb. 2.25 — DM-Verseilung

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 Phantomkreis bei Sternverseilung wegen zu großer Kapazität nicht für Fernsprechen geeignet.

2.6.4.2. 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 Doppeladernzahl zusammengesetzt werden. Diese Tatsache macht zusätzliche Maßnahmen bei oder nach Auslegung und Montage einer Kabelverbindung erforderlich.

Für den Kopplungsausgleich kommen drei Maßnahmen in Frage:

- Widerstandsausgleich,**
- Kondensatorenausgleich und**
- Kreuzungsausgleich.**

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
Ader 1a	15 Ω	15 Ω	30 Ω
Ader 1b	17 Ω	17 Ω	34 Ω

Um den Widerstandsunterschied auszugleichen, wendet man zwei Verfahren an:

- zusätzlicher Einbau eines Widerstandsdrahts in die Einzelader mit dem geringeren Widerstand oder
- 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 Gesamtwiderstand 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), wird das Kreuzungsverfahren zum Widerstandsausgleich im allgemeinen dem anderen Verfahren vorgezogen.

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.

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.

Für den Kreuzungsausgleich innerhalb eines Viererseils gibt es 8 Schaltungsmöglichkeiten, die nach der Übersicht (Abb. 2.26) mit einer Nr. bezeichnet werden.

Die Kreuzung der Kabeladern würde natürlich Schwierigkeiten bei der Fehlerengrenzung zur Folge haben, da z. B. die Ader 1a am Kabelabschluß der nächsten Endstelle nicht mehr auf Platz 1a 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.

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

Abb. 2.26 — Kreuzungsmöglichkeiten in einem Viererseil

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 NFFVk und TFFVk, 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.

2.7. Phantomkreisbildung

Der größte Kostenanteil einer Fernmeldeanlage entfällt auf den Übertragungsweg. Aus diesem Grunde ist man bestrebt, Fernmelde-

leitungen so günstig wie möglich auszunutzen. Dazu wird neben der Trägerfrequenztechnik, die im Abschn. 4 eingehend behandelt wird, auch ein schaltungstechnisches Verfahren angewandt: Aus den zwei Doppeladern eines Dieselhorst-Martin-Viererseils kann künstlich ein dritter Stromkreis geschaffen werden. Dieser zusätzliche Stromkreis heißt **Phantomkreis** oder auch **Vierer**, während die beiden an der Phantomkreisbildung beteiligten Doppeladern mit **Stamm I** und **Stamm II** bezeichnet werden.

Abb. 2.27 zeigt die Schaltungsanordnung bei der Phantomkreisbildung. Die beiden Stammleitungen sind jeweils durch Fernleitungsübertrager (FIÜ) abgeschlossen. Auf der Sekundärseite haben diese FIÜ Mittelanzapfungen, an denen die Sekundärwicklung eines dritten FIÜ angeschlossen ist. Mit Hilfe dieses dritten FIÜ wird der Phantomkreis gebildet, wobei der Stamm I die Hinleitung und der Stamm II die Rückleitung des Phantomkreises bilden.

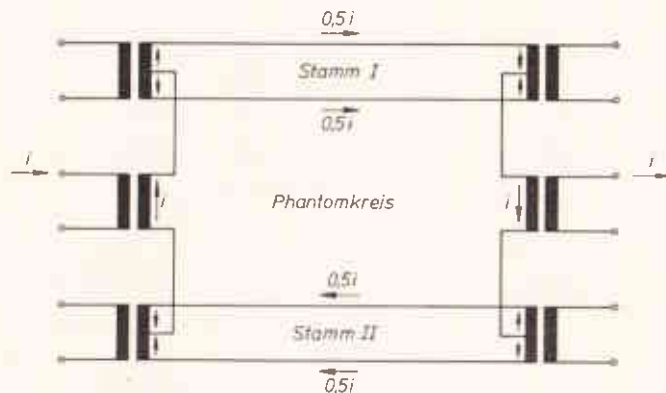


Abb. 2.27 — Bildung eines Phantomkreises

Wir wollen die Wirkungsweise der Phantomschaltung anhand der Abb. 2.27 kennenlernen. Die eingezeichneten Pfeile stellen den Augenblickswert eines Sprechwechselstroms i dar, der über den Phantomkreis übertragen werden soll. In der Mitte des Stamm-I-FIÜ verzweigt sich der Strom in zwei gleich große Teile, die dann jeweils über die a- und die b-Ader des Stamms I übertragen werden. Am anderen Leitungsende vereinigen sich die beiden Teilströme in der Mittelanzapfung des Stamm-I-FIÜ wieder und gelangen auf den Phantom-FIÜ. Der Rückweg des Sprechwechselstroms erfolgt ähnlich über die a- und b-Adern des Stamms II. Auf diese Weise läßt sich der am Sendeort in den Phantomkreis-FIÜ eingespeiste Sprechwechselstrom unverfälscht zum Phantomkreis-FIÜ des Empfangsorts übertragen. Der Nachrichtenfluß auf den beiden Stammleitungen darf natürlich durch die Sprechwechselströme des Phantomkreises nicht gestört werden. Das wird durch die Mittelanzapfungen der Stamm-FIÜ erreicht. Da die Teilströme des Phantomkreises die beiden Teilwicklungen der Stamm-FIÜ in entgegengesetzter Richtung durchfließen, heben sich ihre magnetischen Durchflutungen gegenseitig auf. Damit ist es gewähr-

leistet, daß eine über den Phantomkreis übertragene Nachricht nicht auf den Stammleitungen mitgehört werden kann.

Die Phantomschaltung arbeitet nur unter zwei Bedingungen einwandfrei:

- a) Die Mittelanzapfungen der Stamm-FIÜ müssen genau symmetrisch sein und
- b) a- und b-Ader eines Stamms müssen gleich große Widerstände und Kapazitäten gegen Erde haben.

Bei Abweichungen von diesen Bedingungen kommt es zum Mitsprechen.

Bei der Phantomkreisbildung werden sowohl die beiden Stammleitungen als auch der zusätzliche Vierer durch die FIÜ gleichstrommäßig abgeriegelt. Aus diesem Grunde können Phantomschaltungen im allgemeinen in den Fernsprechnetzen nicht eingesetzt werden, weil dort Gleichstromschaltkennzeichen für den Verbindungsaufbau mit übermittelt werden müssen. Phantomschaltungen werden deshalb vorwiegend in der Fernnetzebene eingesetzt, weil dort Wechselstromschaltkennzeichen verwendet werden, für die die FIÜ kein Hindernis bilden.

3. Niederfrequenz-Verstärkertechnik

3.1. Aufgaben eines Verstärkers

Wir haben im Abschn. 2.4.2 gesehen, daß die gesamte Bezugsdämpfung einer Fernsprechverbindung einen bestimmten Höchstwert nicht überschreiten darf, nämlich 36 dB, wenn eine ausreichende Übertragungsgüte gewährleistet bleiben soll. Nach dem Dämpfungsplan 55 (vgl. Abb. 2.18) dürfen die Verbindungsleitungen zwischen den Vermittlungsstellen daran mit höchstens 19 dB Leitungsdämpfung beteiligt sein. Anhand des Diagramms der Abb. 2.13 können wir erkennen, was das bedeutet: 19 dB Dämpfung entspricht einem Spannungsverhältnis von etwa 1 : 9; wenn beispielsweise eine Nachricht mit 9 V Spannung in eine solche Leitung eingespeist wird, kommt sie am Ausgang nur noch mit 1 V Spannung an, wobei angepaßter Leitungsabschluß Voraussetzung ist. Mit unbespulten Kabeladern sind 19 dB Leitungsdämpfung im allgemeinen nur im Ortsnetz oder im Nahbereich einzuhalten. Auch das Einfügen von Pupinspulen setzt den Dämpfungskennwert einer Kabelleitung nicht so weit herab, daß beliebig große Entfernungen überbrückt werden können.

Beispiele:

- a) Eine unbespulte Kabel Doppelader (0,8 mm ϕ) hat bei $f = 800$ Hz einen Dämpfungskennwert von $0,67 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$. Bei einer Leitungslänge von etwa 28 km ist der höchstzulässige Dämpfungswert von 19 dB erreicht, denn $28,4 \text{ km} \cdot 0,67 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = 19 \text{ dB}$.
- b) Eine mittelschwer bespulte Kabel Doppelader (0,8 mm ϕ) hat bei $f = 800$ Hz einen Dämpfungskennwert von $0,22 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$. Der höchstzulässige Dämpfungswert ist bei etwa 86 km Leitungslänge erreicht.

Die tatsächlich erreichbaren Leitungslängen müssen aber etwas kleiner angesetzt werden, weil die Dämpfungen der technischen Einrichtungen in den Vermittlungsstellen noch hinzukommen.

Fernsprechleitungen, die im Weitverkehr eingesetzt sind (z. B. als Verbindungsleitungen im SWFD), müssen deshalb gewöhnlich verstärkt werden. Das bedeutet, daß in regelmäßigen Abständen **Verstärker** in die Leitung eingeschleift werden müssen, die der zu übertragenden Nachricht Energie, die infolge Leitungsdämpfung verlorengegangen ist, wieder zufügen sollen. Solche Leitungen werden als **verstärkte Niederfrequenz-Leitungen (NF-Leitungen)** bezeichnet, weil die Nachrichtenübertragung in der natürlichen (= niederfrequenten) Frequenzlage der Sprache erfolgt.

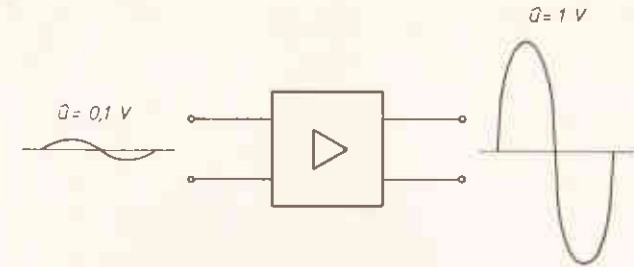


Abb. 3.1 — Prinzip der Verstärkung

In Abb. 3.1 ist die Wirkung eines Verstärkers dargestellt. Auf den Verstärkereingang gelangt eine stark gedämpfte sinusförmige Signalspannung mit einem Maximalwert von beispielsweise $\hat{u} = 0,1$ V. Am Verstärkerausgang wird das gleiche Signal verstärkt abgegeben, und zwar jetzt beispielsweise mit $\hat{u} = 1$ V. An der Frequenz der Signalspannung hat sich nichts geändert.

Die Höhe der Energiezufuhr, die eine Nachricht im Verstärker erhält, wird durch das **Verstärkungsmaß s** ausgedrückt. Dabei setzt man die Spannung oder die Leistung am Ausgang des Verstärkers zu den entsprechenden Werten am Eingang ins Verhältnis. Dieses Verhältnis wird nicht als lineare Verhältniszahl, sondern als Logarithmus ausgedrückt. Die Einheit des Verstärkungsmaßes ist daher das **Dezibel (dB)**, wobei die Definition die gleiche ist wie beim Dämpfungsmaß (vgl. Abschn. 2.4.1). **Man kann damit eine Verstärkung als negative Dämpfung auffassen.** Das in dB angegebene Dämpfungsmaß eines Leitungsabschnitts und das in dB angegebene Verstärkungsmaß eines Zwischenverstärkers können daher mit entgegengesetzten Vorzeichen aufaddiert werden.

Größe	Formelzeichen	Einheit	
		Name	Zeichen
Verstärkungsmaß	s	Dezibel	dB

Zur Berechnung des Spannungsverhältnisses an einem Verstärker bei gegebenem Verstärkungsmaß in dB können wir folglich das in Abb. 2.13 dargestellte Diagramm benutzen, wobei allerdings die Proportion umgekehrt werden muß, also $\frac{U_2}{U_1}$ eingesetzt wird.

Beispiele:

- a) Wie groß ist die Ausgangsspannung an einem Verstärker, der mit $s = 26$ dB arbeitet, wenn die ankommende Nachricht am Verstärkereingang 25 mV hat?

Lösung:

Nach dem Diagramm in Abb. 2.13 entspricht einer Verstärkung von 26 dB ein Spannungsverhältnis von 20 : 1. Die Ausgangsspannung beträgt damit $U_2 = 20 \cdot 25 \text{ mV} = 500 \text{ mV}$.

- b) Wie groß ist das Verstärkungsmaß s eines Verstärkers, wenn am Eingang eine Spannung $U_1 = 20 \text{ mV}$ und am Ausgang eine Spannung $U_2 = 800 \text{ mV}$ gemessen werden?

Lösung:

Das Verhältnis von Ausgangsspannung zu Eingangsspannung ist

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{800 \text{ mV}}{20 \text{ mV}} = 40 : 1.$$

Aus dem Diagramm in Abb. 2.13 können wir ablesen, daß dieses Spannungsverhältnis einem Verstärkungsgrad von $s \approx 32 \text{ dB}$ entspricht.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die verstärkten NF-Leitungen im Fernsprecherndienst eine viel geringere Rolle spielen als die Trägerfrequenzkanäle (TF-Kanäle, siehe Abschn. 4). Insbesondere in den stark benutzten Verkehrsbeziehungen des SWFD, das sind beispielsweise die Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen ZVSt oder zwischen den ZVSt und den HVSt, sind TF-Kanäle meistens wesentlich kostengünstiger einzurichten und zu betreiben als verstärkte NF-Leitungen. Aus diesem Grunde liegt die zukünftige Entwicklung im Leitungsnetz der DBP (Fernebene) mehr bei der TF-Technik als bei der NF-Technik. Dennoch wird auch die NF-Technik nicht ganz an Bedeutung verlieren, weil es im Weitverkehrsnetz der DBP noch alte betriebsfähige Kabel gibt, die nur NF-mäßig auszunutzen sind.

3.2. Pegel

In der Übertragungstechnik werden die Spannungs- und Leistungswerte, die an den verschiedenen Meßpunkten ermittelt werden, nur selten in den absoluten Maßen Volt oder Watt angegeben. Statt dessen arbeitet man meistens mit Vergleichswerten. Das Verhältnis eines Meßwerts zum festgesetzten Vergleichswert heißt **Pegel p**. Ähnlich wie beim Dämpfungsmaß und wie beim Verstärkungsmaß wird auch der Pegel logarithmisch errechnet und in dB angegeben.

Als Vergleichswerte für die Bestimmung eines Pegels sind in der Übertragungstechnik allgemein festgelegt:

- a) für die Spannung 775 mV an 600 Ω ,
- b) für die Leistung 1 mW an 600 Ω .

Das logarithmische Verhältnis eines Meßwerts zu der betreffenden Bezugsgröße heißt **absoluter Pegel**, angegeben in dB (häufig auch dBm¹). Vergleicht man Spannungswerte, so spricht man vom **absoluten Spannungspegel**; vergleicht man dagegen Leistungswerte, so erhält man den **absoluten Leistungspegel**. Unter der Voraussetzung, daß die Messungen an einem Abschlußwiderstand von 600 Ω vorge-

¹ Der Zusatz m bei dBm bedeutet milli; er weist darauf hin, daß die Pegelangabe auf 775 mV bzw. 1 mW bezogen ist.

nommen werden, haben der absolute Spannungspegel und der absolute Leistungspegel die gleichen Werte in dB.

Pegelwerte können positiv oder negativ sein. Ein positiver absoluter Spannungspegel bedeutet, daß eine Spannung gemessen wird, die größer als 775 mV ist. Wird dagegen ein negativer absoluter Spannungspegel festgestellt, so ist der tatsächlich vorliegende Spannungswert kleiner als 775 mV. Eine Spannung von genau 775 mV hat demnach den absoluten Spannungspegel Null. Zur Umrechnung von Pegelwerten in Spannungswerte und umgekehrt können wir das Diagramm in Abb. 2.13 zur Hilfe nehmen.

Beispiele:

- a) Am Anfang eines Übertragungssystems soll ein absoluter Spannungspegel von -17 dB vorliegen. Welcher tatsächlichen Spannung entspricht dieser Pegel?

Lösung:

Zunächst entnehmen wir dem negativen Vorzeichen, daß die Spannung kleiner als 775 mV sein muß. Nach dem Diagramm in Abb. 2.13 gehört zu 17 dB ein Spannungsverhältnis von $1 : 7$. Damit beträgt die tatsächliche Spannung:

$$U = 1 : 7 \cdot 775 \text{ mV} = 110,7 \text{ mV}$$

- b) Am Ausgang eines Verstärkers wird die verstärkte Nachricht mit einer Spannung von $1,35 \text{ V}$ abgegeben. Welcher absolute Spannungspegel ist das?

Lösung:

Da die Spannung größer als 775 mV ist, ist das Vorzeichen des Pegelwerts positiv. Das lineare Spannungsverhältnis beträgt:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1,35 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} = 1,75 : 1$$

Nach dem Diagramm in Abb. 2.13 gehört zu diesem Spannungsverhältnis ein Pegelwert von etwa 5 dB . Der absolute Spannungspegel beträgt also $+5 \text{ dB}$.

Ähnlich wie bei der Dämpfung können wir uns auch für Pegelbestimmungen eine Faustregel merken: Eine Heraufsetzung des Pegels um 6 dB bedeutet eine Spannungsverdopplung, während eine Herabsetzung des Pegels um 6 dB einer Spannungshalbierung entspricht.

Bei der Pegelmessung im praktischen Übertragungsbetrieb wird mit Voltmetern gearbeitet, deren Skalen in dB geeicht sind. Man liest dabei den absoluten Spannungspegel direkt ab und erspart sich somit das umständliche Umrechnen. Solche Meßgeräte heißen **Pegelmesser**.

Der Verlauf des absoluten Pegels längs einer verstärkten NF-Leitung läßt sich anschaulich durch ein **Pegeldiagramm** verdeutlichen (Abb. 3.2). Am Leitungseingang wird die Nachricht mit einem Pegel von -17 dB von der Fernsprechvermittlungsstelle übernommen. Der Endverstärker am Anfang der Leitung hat ein Verstärkungsmaß von 22 dB , so daß der Pegel schlagartig auf $+5 \text{ dB}$ heraufgesetzt wird.

Mit diesem Pegel wird die Nachricht auf den ersten Leitungsabschnitt gegeben. Durch die abfallende Linie ist das allmähliche Absinken des Pegels infolge der Leitungsdämpfung dargestellt. In dem gezeichneten Beispiel beträgt die Leitungsdämpfung des ersten Leitungsabschnitts $\alpha_1 = 29$ dB. Vor dem **Zwischenverstärker** beträgt der absolute Pegel daher nur noch -24 dB. Der Zwischenverstärker soll beispielsweise auf ein Verstärkungsmaß von 29 dB eingeregelt sein, so daß der Pegel schlagartig auf $+5$ dB heraufgesetzt wird. Der zweite Leitungsabschnitt hat nur ein Dämpfungsmaß von $19,5$ dB, so daß am Ende der Leitung ein Pegel von $-14,5$ dB vorliegt. Der Endverstärker setzt diesen Pegel auf $+9$ dB herauf, und damit wird die Nachricht wieder an die Fernsprechvermittlungsstelle abgegeben.

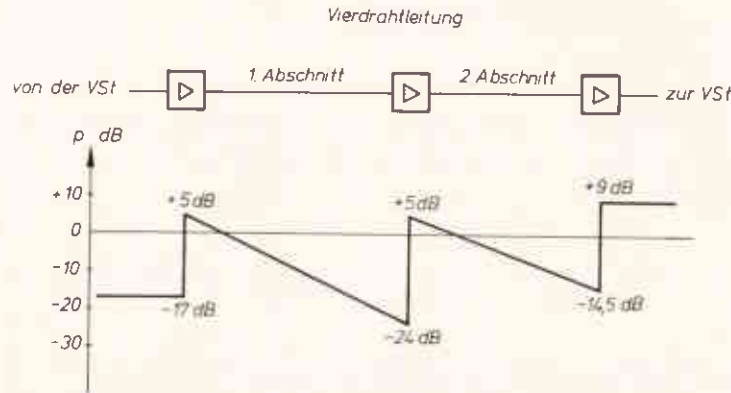


Abb. 3.2 — Pegeldiagramm einer verstärkten NF-Leitung

Anhand des Pegeldiagramms wird auch deutlich, warum mit logarithmischen Maßen gearbeitet wird: Dämpfungsmaß und Verstärkungsmaß lassen sich einfach addieren, wobei die Vorzeichen beachtet werden müssen. Durch das Ergebnis dieser Rechnung erhält man auf sehr einfache Weise den absoluten Pegel.

Es stellt sich nun die Frage, warum Zwischenverstärker im Zuge der Leitung liegen müssen. Theoretisch könnte man ja den Pegel sehr stark abfallen lassen und lediglich durch einen Endverstärker am Leitungsende wieder anheben. Dann aber würde die auf einen sehr kleinen Pegel abgesunkene Nachricht stark durch Fremdstörungen beeinflusst (Nebensprechen, Geräusche usw.). Aus diesem Grunde läßt man den Pegel nicht unter den festgesetzten Minimalwert -26 dB abfallen. Andererseits darf der Pegel auch einen gewissen Höchstwert nicht überschreiten, weil bei zu hohen Leistungswerten die Nachbaradern zu stark beeinflusst würden (Nebensprechen). Außerdem wird ein Verstärker bei zu hohem Verstärkungsgrad übersteuert, so daß Klirrverzerrungen auftreten. Der maximal auf einer Leitung zu-

lässige Pegel liegt bei $+9,5$ dB. Es ist daher leicht einzusehen, daß nach einer gewissen Leitungslänge, die nicht zu groß sein darf, eine Anhebung des Pegels erforderlich ist. Der Abstand der Verstärker in einer Leitung heißt **Verstärkerfeldlänge**. Bei verstärkten NF-Leitungen kommen hauptsächlich die Verstärkerfeldlängen $72,5$ km (Zweidrahtleitung) und 145 km (Vierdrahtleitung) in Frage. Bei TF-Leitungen sind die Verstärkerfeldlängen wesentlich kleiner, sie reichen bis zu $1,55$ km hinab (vgl. Tabelle 4.1).

3.3. Arten von verstärkten NF-Leitungen

3.3.1. Zweidrahtleitung

Die Anschlußleitungen der Fernsprechanlüsse sind bekanntlich zweidrahtig geschaltet. Bei Gesprächen innerhalb eines Ortsnetzes wird die gesamte Verbindung über alle Wahlstufen und Verbindungsleitungen zweidrahtig durchgeschaltet. Über diese Zweidrahtverbindung kann der Nachrichtenaustausch in beiden Richtungen erfolgen.

Schwierigkeiten entstehen dann, wenn Verstärker in die Leitung eingefügt werden müssen, z. B. in die Verbindungsleitungen des SWFD. Verstärker der herkömmlichen Bauart haben nämlich die Eigenschaft, die Nachrichten nur in einer Richtung durchzulassen und dabei zu verstärken; die Gegenrichtung wird durch die Verstärker gesperrt. Da aber auch bei verstärkten Leitungen der Nachrichtenaustausch in beiden Richtungen erfolgen soll, müssen die Verstärker stets paarweise eingesetzt werden: ein Verstärker für die eine Richtung einer Leitung und ein zweiter Verstärker für die Gegenrichtung. Vor und hinter jedem Verstärker müssen die beiden Richtungen des Nachrichtenflusses aufgetrennt und auf den für sie bestimmten Verstärker geleitet werden. Dazu dienen **Gabelschaltungen**. Da der Nachrichtenfluß bei einer solchen verstärkten NF-Leitung über eine Doppelader erfolgt, spricht man von einer **Zweidrahtleitung**. Abb. 3.3 zeigt ein Übersichtsbild einer Zweidrahtleitung mit einem Zwischenverstärker und je einem Endverstärker an den beiden Leitungsenden.

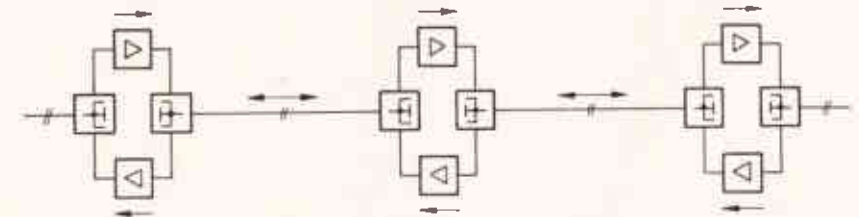


Abb. 3.3 — Verstärkte Zweidrahtleitung

Die kritischen Punkte einer Zweidrahtleitung sind die Gabelschaltungen. Die in ihnen eingesetzten Nachbildungen (vgl. auch Abschn. 3.4.1 und Abb. 3.6) können häufig die Eigenschaften der Leitungen nicht hundertprozentig nachbilden. Dadurch entstehen Rückkopplungen, die die Stabilität der Leitung beeinträchtigen. Die Stabilität der Leitung wird um so geringer, je mehr Rückkopplungspunkte, d. h. Gabelschaltungen, sie hat. Aus diesem Grunde dürfen Zweidrahtleitungen höchstens zwei bis drei Zwischenverstärker haben. Außerdem wird die Neigung der Zweidrahtleitung zur Rückkopplung mit zunehmendem Pegel der Nachricht größer. Das Verstärkungsmaß der Zwischenverstärker darf folglich nicht zu groß sein: Die Verstärkerfeldlänge bei einer Zweidrahtleitung ist deshalb mit 72,5 km nur halb so groß wie bei einer Vierdrahtleitung.

3.3.2. Vierdrahtleitung

Wegen der genannten Nachteile kommen Zweidrahtleitungen verhältnismäßig selten vor. Viel häufiger sind **Vierdrahtleitungen**. Dabei ist für die beiden Richtungen des Nachrichtenflusses je eine eigene Doppelader geschaltet. Die Zwischenverstärker können jetzt ohne Gabelschaltungen einfach in die Leitungen eingeschleift werden. Gabeln sind nur noch an den Leitungsenden erforderlich. Da in einer solchen Leitung nur zwei Rückkopplungspunkte sind (die beiden Gabeln), lassen sich beliebig viele Verstärker einschalten. Auch läßt sich das Verstärkungsmaß der einzelnen Zwischenverstärker höher einstellen als bei der Zweidrahtleitung: Die Vierdrahtleitung hat deshalb eine doppelt so große Verstärkerfeldlänge, nämlich 145 km. Abb. 3.4 zeigt das Übersichtsbild einer Vierdrahtleitung mit einem Zwischenverstärker und je einem Endverstärker an den beiden Leitungsenden.



Abb. 3.4 — Verstärkte Vierdrahtleitung

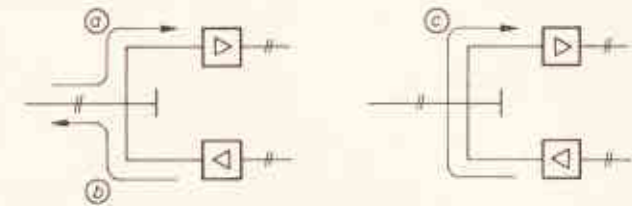
Fernsprechverbindungen im SWFD sind gewöhnlich zwischen der KVSt des rufenden Anschlusses und der KVSt des gerufenen Anschlusses vierdrähtig durchgeschaltet. Wird beispielsweise auf dem Teilstück KVSt-HVSt eine verstärkte Vierdrahtleitung als Verbin-

ungsleitung eingesetzt, so erübrigen sich die Gabeln an den beiden Leitungsenden, weil die Leitung bereits von der Vermittlungstechnik aus vierdrähtig angesteuert wird. Der Übergang von der Zweidrahtführung auf die Vierdrahtführung erfolgt in diesem Fall in Übertragungen der Fernvermittlungstechnik.

3.4. Bauteile eines NF-Verstärkers

3.4.1. Gabelschaltung

Beim Übergang von einer Zweidrahtleitung auf eine Vierdrahtleitung bzw. umgekehrt ist stets der Einsatz einer Gabelschaltung erforderlich. Auch bei verstärkten Zweidrahtleitungen müssen vor und hinter jedem Zwischen- und Endverstärker Gabelschaltungen eingesetzt werden. Die Aufgabe der Gabelschaltung soll anhand der nachfolgenden Prinzipskizzen (Abb. 3.5) veranschaulicht werden.



- a = Nachrichtenfluß von der Zweidrahtleitung zur Vierdrahtleitung
- b = Nachrichtenfluß von der Vierdrahtleitung zur Zweidrahtleitung
- c = unerwünschter Nachrichtenrückfluß (Rückkopplung)

Abb. 3.5 — Grundsätzliche Wirkung einer Gabel

Der von der Zweidrahtleitung kommende Nachrichtenfluß soll auf die gehende Doppelader der Vierdrahtleitung gelangen (Abb. 3.5 a). Die Gabeldämpfung beträgt dabei etwa 3 ... 3,5 dB. In der Gegenrichtung darf der Nachrichtenfluß von der kommenden Doppelader der Vierdrahtleitung nur auf die Zweidrahtleitung gelangen (Abb. 3.5 b). Auch hier beträgt die Gabeldämpfung etwa 3 ... 3,5 dB. Der Nachrichtenrückfluß (Abb. 3.5 c) dagegen muß so klein wie möglich sein, am besten natürlich gleich null. Wenn nämlich ein merklicher Rückfluß vorhanden ist, kann die Leitung anfangen zu pfeifen (Leitung ist nicht mehr stabil).

Wegen ihrer engen Verbindung zum Verstärkerbetrieb sind alle NF-Verstärker mit zwei Gabelschaltungen ausgerüstet. Je nach der Betriebsart können beide Gabeln eingeschaltet sein (Zweidrahtver-

stärker), es kann nur eine Gabel in Betrieb sein (Übergangsverstärker), und es können auch beide Gabeln ausgeschaltet sein (Vierdrahtzwischenverstärker).

Die Gabelschaltung besteht aus einem Brückenübertrager und einer **Nachbildung**. Die Nachbildung soll die elektrischen Eigenschaften der Zweidrahtleitung möglichst genau nachbilden. Sie besteht aus Widerständen, Spulen und Kondensatoren.

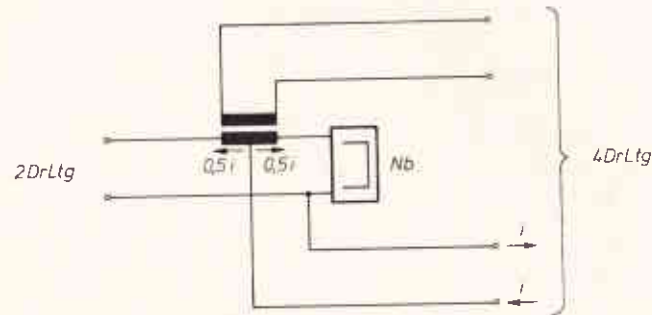


Abb. 3.6 — Gabelschaltung

Wir wollen die Wirkungsweise einer Gabelschaltung anhand der Abb. 3.6 kennenlernen. Die eingezeichneten Pfeile stellen den Augenblickswert eines Sprechwechselstroms i dar, der über die ankommende Doppelader der Vierdrahtleitung empfangen wird. In der Mitte der Primärwindung des Brückenübertragers verzweigt sich der Strom in zwei Teilströme. Stimmt die Nachbildung genau mit den elektrischen Eigenschaften der Zweidrahtleitung überein, dann sind die beiden Teilströme gleich groß, nämlich $0,5 i$. Da sie die beiden Teilwicklungen des Brückenübertragers in entgegengesetzter Richtung durchfließen, heben sich ihre magnetischen Durchflutungen in der Sekundärwindung gegenseitig auf. Dadurch ist gewährleistet, daß die ankommende Nachricht nicht wieder auf die abgehende Doppelader gelangen kann.

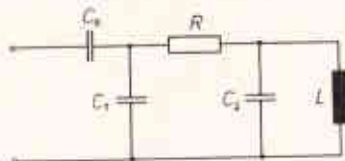


Abb. 3.7 — Schaltung einer Nachbildung

Abb. 3.7 zeigt das Grundschaltbild einer im Verstärkerbetrieb häufig verwendeten Nachbildung (Hoytnachbildung). Die Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten lassen sich mit Schaltern stufenweise verändern. In der Praxis sind mehrere verschiedene Verfahren gebräuchlich, mit denen die Nachbildungen an die nachzubildenden Leitungen angepaßt werden. Von der Genauigkeit, mit der die Zweidrahtleitung nachgebildet wird, hängt die Pfeifsicherheit der Leitung

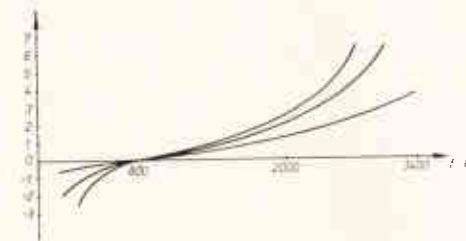
ab. Es kann in der Praxis vorkommen, daß eine verstärkte Leitung nach längerer einwandfreier Betriebszeit plötzlich anfängt zu pfeifen. Der Grund könnte dann darin liegen, daß sich die Eigenschaften der Zweidrahtleitung durch jahreszeitliche Witterungseinflüsse geändert haben, so daß die Nachbildung plötzlich ungenau wird.

3.4.2. Entzerrer

Wir wissen bereits aus Abschn. 2.4, daß Fernmeldeleitungen einen frequenzabhängigen Dämpfungsverlauf haben. Höhere Frequenzen werden stärker gedämpft als tiefe Frequenzen (Dämpfungsverzerrung). Je nach Art der Leitung kann der Dämpfungsanstieg mit zunehmender Frequenz recht unterschiedlich sein. In der Abb. 2.21 ist dieser Zusammenhang anschaulich dargestellt.

Die Arbeitsweise eines Verstärkers muß den jeweiligen Dämpfungsverlauf der Leitung, die verstärkt werden soll, berücksichtigen: Die stärker gedämpften Frequenzen müssen mehr verstärkt werden als die schwächer gedämpften Frequenzen. Zu diesem Zweck sind alle

Δs dB



Δs = Verstärkungsunterschied gegenüber 800 Hz

Abb. 3.8 — Entzerrerkurven eines NF-Verstärkers

Verstärker mit **Entzerrern** ausgerüstet. Diese bestehen aus frequenzabhängigen Widerständen, die veränderbar sein müssen. Für jede Leitung muß die Entzerrerschaltung so eingestellt werden, daß am Ausgang des Verstärkers alle Frequenzen mit etwa dem gleichen Pegel abgegeben werden. Abb. 3.8 zeigt als Beispiel einige Verstärkungskurven, auf die ein Verstärker eingestellt werden kann. Dabei können die Kurven oberhalb und unterhalb von 800 Hz getrennt eingestellt werden. Bei ungenügender Einstellung treten noch geringe Dämpfungsverzerrungen auf.

3.4.3. Verstärker

Der eigentliche Verstärker besteht aus einer Transistorschaltung mit Vor- und Nachübertragern. Ältere Ausführungen, die aber gegenwärtig auch noch im Betrieb vorzufinden sind, haben Röhren anstelle von Transistoren. Das Verstärkungsmaß ist durch Schaltung und

Kenndaten der Transistoren (Röhren) festgelegt. Bei der derzeit modernsten Bauform (Allverstärker IV, siehe Abschn. 3.5) beträgt es $s = 35$ dB für die Frequenz 800 Hz. Nach dem Diagramm in Abb. 2.13 bedeutet das eine Spannungsverstärkung auf den 55fachen Eingangswert. Natürlich wird ein so hohes Verstärkungsmaß nur selten voll benötigt, in den meisten Fällen kommt man mit geringeren Werten aus. Die Verstärkung muß deshalb meistens herabgesetzt werden. Dazu dient ein in die Verstärkerschaltung eingebautes **regelbares Dämpfungsglied**, bestehend aus einem Netzwerk von ohmschen Widerständen. Das wirksame Verstärkungsmaß, das der Verstärker damit erhält, läßt sich in Stufen von je 1 Np grob und in weiteren Stufen von je 0,1 Np fein einstellen. Die Einstellskalen aller NF-Verstärker sind noch in Np geeicht, weil zum Zeitpunkt der Einführung der letzten Neuentwicklung (Allverstärker IV) das Maß dB bei der DBP noch nicht allgemein eingeführt war. Wir wissen aber aus Abschn. 2.4.1, daß die Umrechnung sehr einfach ist, nämlich $1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$, oder $1 \text{ dB} = 0,1151 \text{ Np}$.

Beispiel:

Ein häufig für den Betrieb von NF-Leitungen eingesetztes mittelschwer bespultes Kabel hat einen Dämpfungskennwert von $\alpha = 0,21 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$. Auf welches Verstärkungsmaß (in Np) muß ein NF-Verstärker bei einer Vierdrahtleitung (Verstärkerfeldlänge 145 km) eingeregelt werden, um die Dämpfung voll auszugleichen?

Lösung:

Die Gesamtdämpfung der Leitung beträgt:

$$\alpha = 145 \cdot 0,21 = 30,45 \text{ dB}$$

oder in Neper ausgedrückt:

$$\alpha = 30,45 \cdot 0,115 = 3,5 \text{ Np}$$

Das Verstärkungsmaß muß deshalb auf 3,5 Np eingestellt werden.

3.5. Konstruktive Bauformen der NF-Verstärkereinrichtungen

Alle NF-Verstärker haben grundsätzlich die gleiche Aufgabe, nämlich elektrische Sprachnachrichten in ihrer natürlichen Frequenzlage zu verstärken. Ihr Einsatz kann allerdings unter recht unterschiedlichen Bedingungen erfolgen. Wir wollen hier einige wichtige Möglichkeiten nennen:

- Zweidrahtzwischenverstärker mit 2 Gabeln,
- Vierdrahtzwischenverstärker ohne Gabeln,
- Vierdrahtendverstärker mit 1 Gabel (Ausgang zur Vermittlungsstelle zweidrahtig).

Die Blockschaltbilder einer NF-Verstärkereinrichtung für diese drei Einsatzmöglichkeiten sind in Abb. 3.9 in vereinfachter Form dargestellt. Zusätzlich zu den Bauteilen, die wir bisher kennengelernt haben, ist noch ein regelbarer Tiefpaß eingefügt. Dieser hat die Aufgabe, Störgeräusche über 3400 Hz vom Verstärker fernzuhalten. Außerdem soll er bei bespulten Leitungen die höheren Frequenzen sperren, weil es sehr schwierig ist, für diesen Frequenzbereich die Pupinleitung genau nachzubilden. Je nach der Leitungsart kann solch ein Tiefpaß auf eine Grenzfrequenz zwischen 2100 Hz und 3400 Hz eingeregelt werden.

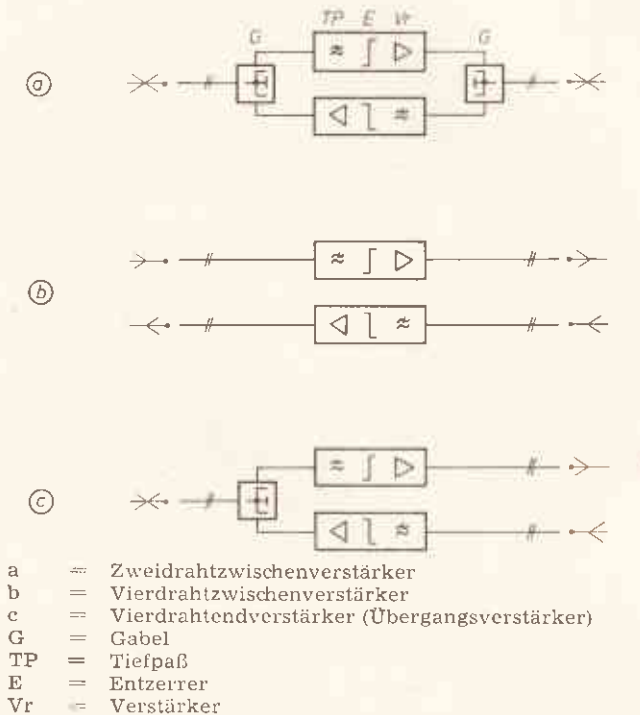


Abb. 3.9 — Blockschaltbild einer NF-Verstärkerstufe

Für die dargestellten unterschiedlichen Aufgaben wurde der **Allverstärker** entwickelt. Er enthält alle Bauteile wie Gabeln, Entzerrer, Tiefpässe, regelbare Verstärker, die für die verschiedenen Einsatzgebiete benötigt werden. Durch Umstecken der Baugruppen und durch Drehschalter können alle notwendigen Einstellungen von außen vorgenommen werden. Bei älteren Ausführungen sind dazu noch Lötarbeiten notwendig.

Die vorläufig letzte Entwicklung ist der **Allverstärker IV**. Wie Abb. 3.10 zeigt, sind die einzelnen Bauteile als Steckbaugruppen ausgebildet, die gemeinsam in einem Einschubrahmen untergebracht sind. Ein Einschubrahmen enthält sämtliche für den Betrieb eines NF-Verstärkers erforderlichen Bauteile. Jeweils 48 solcher Einschubrahmen lassen sich in einem Verstärkergestell (2,60 m hoch, 60 cm breit) unterbringen. Werden in kleinen Verkehrsbeziehungen nur wenige Verstärker benötigt, so ist auch die Unterbringung in Kleingestellen oder in Koffern (beweglicher Einsatz) möglich.

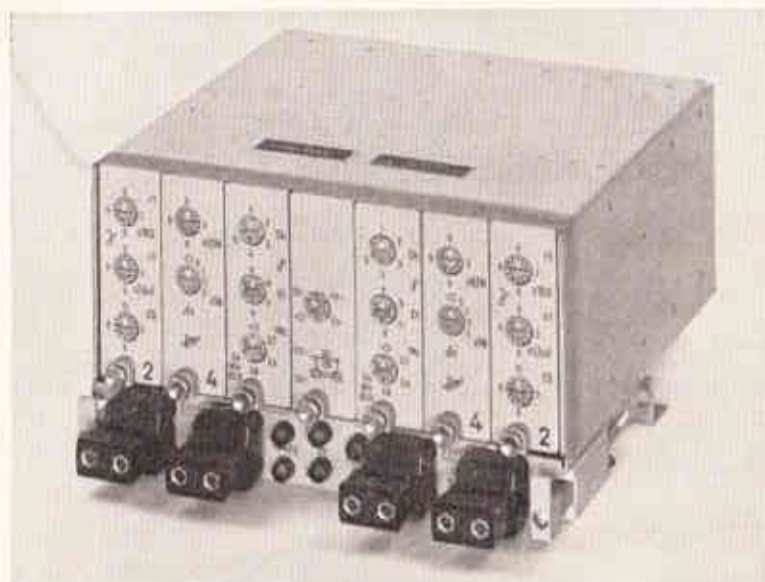


Abb. 3.10 — Ansicht des Allverstärkers IV

Für die räumliche Unterbringung der Verstärkereinrichtungen kommen in erster Linie Fernmeldedienstgebäude in Frage. Da diese natürlich nicht immer alle 145 km (Vierdrahtleitungen) oder alle 72,5 km (Zweidrahtleitungen) entlang der Leitung vorzufinden sind, wird in der Praxis häufig auch mit kleineren Verstärkerfeldlängen gearbeitet. Als Ausgleich dafür muß dann natürlich das Verstärkungsmaß kleiner eingestellt werden.

3.6. NLT-Verstärker

Die Leitungen in der untersten Ebene des Fernsprechnetzes sind grundsätzlich unverstärkt. Dazu gehören Anschlußleitungen, Orts-

verbindungsleitungen zwischen den OVSt, Nebenanschlußleitungen zu außenliegenden Nebenstellen, Querverbindungsleitungen zwischen Nebenstellenanlagen usw. Mitunter kann es vorkommen, daß hierbei außergewöhnlich lange Leitungen geschaltet werden müssen, z. B. zu einer sehr weit entfernten Nebenstelle. Je nach dem vorhandenen Leitungstyp (Aderndurchmesser) ist es manchmal schwierig oder gar unmöglich, die nach dem Dämpfungsplan 55 vorgesehenen Bezugsdämpfungswerte einzuhalten. Auch Sprech- und Hörkapseln der höchsten Empfindlichkeitsgruppe helfen dann oft nicht mehr weiter. Um die Dämpfung solcher Leitungen herabzusetzen, wurde speziell der **NLT-Verstärker** entwickelt (NLT bedeutet **N**egative **L**eitung mit **T**ransistoren). Es handelt sich hierbei um einen **Zweidrahtverstärker**, der nur auf unbespulten Kabeladern eingesetzt wird.

Die Wirkungsweise eines NLT-Verstärkers weicht grundsätzlich von der eines üblichen Verstärkers ab. Im wesentlichen besteht er aus einer Schaltung, die ähnlich wie das Ersatzschaltbild einer Fernmeldeleitung aufgebaut ist (vgl. Abb. 2.3). Die beiden Adern der Leitung, die verstärkt werden soll, sind galvanisch durch den NLT-Verstärker hindurchgeführt. An die Längs- und Querschwerte dieser Schaltung sind mittels Übertrager Transistorschaltungen angekoppelt, die für die Energiezufuhr sorgen. Durch die besondere Schaltung dieser Transistorkreise wird eine Umkehr der Widerstände verursacht: Die eigentlich positiven Widerstände im Ersatzschaltbild werden negativ, d. h., aus den passiven Bauelementen sind plötzlich aktive geworden. Dadurch erhält die gesamte Schaltung des NLT-Verstärkers eine negative Dämpfung, oder anders ausgedrückt, es wird ein Verstärkungseffekt erreicht. Hieraus erklärt sich auch die Namensfindung für den NLT-Verstärker: Er hat die gleichen Eigenschaften wie ein Leitungsabschnitt, jedoch mit negativer Dämpfung; er wirkt letztlich dadurch wie eine negative Leitung.

Durch seine besonderen, von einem üblichen Verstärker abweichenden Eigenschaften bietet der NLT-Verstärker eine Reihe von Vorzügen, die gerade beim Einsatz auf Leitungen in der untersten Netzebene des Fernsprechnetzes von Vorteil sind. Zum einen ist seine Schaltung symmetrisch, d. h., er verstärkt den Nachrichtenfluß in beiden Richtungen einer Zweidrahtverbindung gleichmäßig. Gabelschaltungen mit den oft schwierig herzustellenden Nachbildungen entfallen folglich. Zum anderen ist er **gleichstromdurchlässig**. Besondere Maßnahmen für die Übertragung von Schaltkennzeichen der Vermittlungstechnik erübrigen sich somit. Nachteilig ist jedoch das schaltungsbedingte geringe Verstärkungsmaß.

Günstigster Einsatzpunkt für einen NLT-Verstärker ist die Mitte der Leitung, die er verstärken soll. Natürlich läßt sich das aus praktischen Gründen nicht immer verwirklichen. NLT-Verstärker werden daher in der Regel in den OVSt oder in den Nebenstellenanlagen aufgestellt und betrieben.

4. Trägerfrequenztechnik

4.1. Aufgabe der Trägerfrequenztechnik

Der Fernsprechkverkehr hat in den beiden letzten Jahrzehnten einen großen Aufschwung gehabt, der aller Voraussicht nach anhalten wird. Als Folge dieser Entwicklung steigt der Bedarf an Fernmeldeleitungen ständig. Um diesen Leitungsmehrbedarf zu decken, sind jährlich große Geldsummen erforderlich. Besonders teuer sind Fernleitungen, und zwar zum einen wegen der großen Leitungslängen und zum anderen, weil wegen der Dämpfung in regelmäßigen Abständen Verstärker im Zuge der Leitung liegen müssen. Diese Tatsache gab den Anlaß zu Überlegungen, wie die kostspieligen Fernleitungen besser ausgenutzt werden können.

Die Lösung des Problems ist die **Mehrfachausnutzung** einer Fernmeldeleitung durch Nachrichten in verschiedenen Frequenzlagen. Um das zu veranschaulichen, betrachten wir ein uns allen vertrautes Beispiel, nämlich den Rundfunk. Wir wissen, daß beispielsweise auf der Mittelwelle viele Sender ihre Programme ausstrahlen, die sich jeweils durch andere Sendefrequenzen unterscheiden. Als gemeinsamer Übertragungsweg für alle Programme dient der freie Raum. Mit einer Antenne kann eine große Zahl dieser Programme gleichzeitig aufgenommen werden. Da uns hiervon jedoch jeweils nur eins interessiert, filtern wir die uns interessierende Nachricht mit Hilfe eines Bandfilters aus dem aufgenommenen Frequenzgemisch heraus, verstärken und demodulieren sie und machen sie schließlich über einen Lautsprecher hörbar. Der freie Raum wird also mehrfach zur Rundfunkübertragung ausgenutzt.

In ähnlicher Weise lassen sich Fernmeldeleitungen mehrfach ausnutzen. Als Übertragungswege dienen Kabeldoppeladern, Koaxialleitungen oder Richtfunkstrecken, die in der Lage sein müssen, ein möglichst großes Frequenzband zu übertragen. Am Eingang des Übertragungsweges werden die Sprachnachrichten aus ihrer natürlichen Frequenzlage in eine sehr viel höhere Frequenzlage gebracht; dieser Vorgang heißt **Modulation**. Natürlich muß für jede Sprachnachricht eine andere Frequenzlage gewählt werden. Das dabei entstehende Frequenzgemisch, in dem viele voneinander unabhängige Sprachnachrichten verborgen sind, wird über einen gemeinsamen Übertragungsweg übertragen. Die Nachrichten stören sich dabei gegenseitig nicht, weil sie alle verschiedene Frequenzlagen haben. Am Ausgang des Übertragungsweges werden aus dem eintreffenden Frequenzgemisch die einzelnen Sprachnachrichten durch Bandfilter herausgefiltert und

wieder in die natürliche Frequenzlage gebracht. Dieser Vorgang heißt **Demodulation**.

Bei diesem Verfahren der Mehrfachausnutzung von Übertragungswegen dienen viele hohe Frequenzen als **Träger** für die zu übertragenden Sprachnachrichten. Das Verfahren heißt daher **Trägerfrequenztechnik (TF-Technik)**. Ein einzelner Fernsprechverbindungs-
weg, der mit Hilfe der TF-Technik gebildet wird, ist ein **Trägerfrequenzkanal (TF-Kanal)**. Eine Reihe von TF-Kanälen, die gemeinsam über einen Übertragungsweg geleitet werden, bilden mit ihren zugehörigen technischen Einrichtungen ein **Trägerfrequenzsystem (TF-System)**. Moderne TF-Systeme können bis zu 10800 TF-Kanäle haben; das bedeutet, daß bis zu 10800 Sprachnachrichten gleichzeitig über einen Übertragungsweg übertragen werden können. Es ist sicherlich einleuchtend, daß bei einer derartigen Mehrfachausnutzung eine Sprachnachricht im Weitverkehr über einen TF-Kanal wirtschaftlicher übertragen werden kann als über eine nur einfach ausgenutzte Kabeldoppelader. Fernsprechfernleitungen werden daher in der Regel über TF-Kanäle geführt.

4.2. Technik der Frequenzumsetzung

4.2.1. Darstellung von Schwingungen und Frequenzbändern

In den folgenden Ausführungen wird wiederholt von Signalfrequenzen und Sprachnachrichten in der natürlichen Frequenzlage und in der modulierten Frequenzlage die Rede sein. Die Ausführungen lassen sich recht anschaulich durch Frequenzdiagramme unterstützen. Wir wollen daher zunächst die in der TF-Technik allgemein übliche zeichnerische Darstellung von einzelnen Signalfrequenzen und ganzen Signalfrequenzbändern kennenlernen.

Eine Schwingung kann durch zwei Größen hinreichend gekennzeichnet werden, nämlich durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde (Frequenz) und durch die Schwingungsweite (Amplitude).

Wenn mehrere Frequenzen zugleich betrachtet werden müssen, dann bietet es sich an, die Amplituden der einzelnen Schwingungen über einer Frequenzskala einzuzichnen. Abb. 4.1 zeigt als Beispiel zwei Wechselspannungen mit den Frequenzen 10 Hz und 25 Hz sowie den Amplituden 1,5 V und 1 V. Diese in der Nachrichtentechnik häufig verwendete Darstellungsart wird Frequenzspektrum genannt.

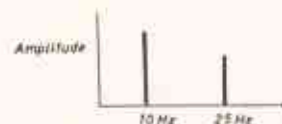


Abb. 4.1 — Frequenzspektrum

In der TF-Technik geht es aber nicht darum, einzelne Signalfrequenzen zu übertragen, sondern es müssen die Frequenzen übertragen werden, die in der menschlichen Stimme vorkommen. Grundsätzlich reicht der Frequenzumfang der Sprache von etwa 80 Hz bis über 5000 Hz. Man kann jedoch auf die Übertragung der tiefen und der hohen Frequenzen verzichten, ohne daß die Verständlichkeit der Sprache verlorengeht; lediglich ihre Natürlichkeit leidet etwas dabei.



Abb. 4.2 — Darstellung des Sprachbandes

Umfangreiche Versuche haben ergeben, daß die menschliche Sprache noch hundertprozentig verständlich ist, wenn sie auf einen **Frequenzumfang von 300 Hz bis 3400 Hz** beschränkt wird. Der Frequenzbereich, der über TF-Kanäle übertragen wird, ist deshalb international

auf diese Werte festgelegt. Die Frequenzen, die in diesem Bereich liegen, bilden das **Sprachband**. Ein Sprachband wird zeichnerisch durch einen Keil dargestellt. Die Spitze des Keils kennzeichnet die tiefste Frequenz des Sprachbandes. In Abb. 4.2 ist das Sprachband in seiner natürlichen Frequenzlage dargestellt. In dieser Frequenzlage wird es auch oft als **niederfrequentes Band (NF-Band)** bezeichnet.

4.2.2. Die amplitudenmodulierte Schwingung

Wir haben im Abschn. 4.1 gesehen, daß es in der TF-Technik darum geht, Sprachnachrichten aus ihrer natürlichen Frequenzlage in eine sehr viel höhere Frequenzlage umzusetzen. Dazu ist es notwendig, eine Trägerfrequenz mit der zu übertragenden Sprachnachricht zu beeinflussen, d. h. zu modulieren. Grundsätzlich läßt sich eine Trägerfrequenz auf mehrere verschiedene Arten modulieren. In der TF-Technik wird aber ausschließlich ein Verfahren angewandt, nämlich die **Amplitudenmodulation**. Dabei wird die Amplitude einer Träger-

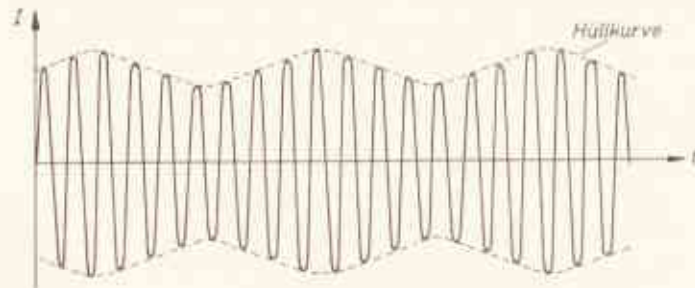


Abb. 4.3 — Amplitudenmodulierte Schwingung

schwingung im Rhythmus der Sprachnachricht beeinflusst: Die zu übertragende Nachricht steckt nach dem Modulationsvorgang in der Hüllkurve der Trägerschwingung. Abb. 4.3 zeigt das Diagramm einer amplitudenmodulierten Schwingung.

Die ursprüngliche Trägerschwingung war eine konstante Sinusschwingung, d. h., sie hatte eine gleichbleibende Amplitude und eine ebenfalls gleichbleibende Frequenz. Die durch den Modulationsvorgang entstandene amplitudenmodulierte Schwingung unterscheidet sich in zwei Punkten wesentlich von der ursprünglichen Trägerschwingung. Wie Abb. 4.3 anschaulich zeigt, ist die Amplitude nun nicht mehr konstant, sondern sie verändert sich ständig. Weniger anschaulich ist die andere Veränderung. In der amplitudenmodulierten Schwingung sind nämlich neben der ursprünglichen Trägerfrequenz zwei neue Frequenzen enthalten, die durch den Modulationsvorgang entstanden sind.

Diese neuen Frequenzen sind einmal die Summe aus Trägerfrequenz und Signalfrequenz und zum anderen die Differenz aus Trägerfrequenz und Signalfrequenz. Da sie seitlich zur Trägerfrequenz liegen, heißen sie **Seitenfrequenzen**. Abb. 4.4 zeigt das Frequenzspektrum des Modulationsproduktes, dessen Liniendiagramm in Abb. 4.3 dargestellt ist.



f_T = Trägerfrequenz
 f_o = obere Seitenfrequenz
 f_u = untere Seitenfrequenz

Abb. 4.4 — Frequenzspektrum einer amplitudenmodulierten Schwingung

Ein Zahlenbeispiel soll zur Verdeutlichung dienen: Eine Trägerfrequenz von 20 kHz wird mit einer Signalfrequenz von 800 Hz amplitudenmoduliert. In dem entstehenden Modulationsprodukt sind dann die folgenden Frequenzen enthalten: 19,2 kHz, 20 kHz und 20,8 kHz.

Dem Diagramm einer amplitudenmodulierten Schwingung (Abb. 4.3) kann man es nicht ansehen, daß es sich aus einem Gemisch von mehreren Frequenzen zusammensetzt. Der Nachweis läßt sich mathematisch oder meßtechnisch führen, ist jedoch sehr schwierig, und deshalb soll hier darauf verzichtet werden.

Kommen wir nun wieder auf das eigentliche Ziel der TF-Technik zurück, Sprachbänder zu modulieren und zu übertragen. Es ist bekannt, daß im Sprachband alle Frequenzen zwischen 300 Hz und 3400 Hz vorkommen können. Für jede dieser Frequenzen ist der Modulationsvorgang getrennt zu betrachten. Es können damit viele Seitenfrequenzen oberhalb und unterhalb der Trägerfrequenz entstehen, also zwei **Seitenbänder**, und zwar je ein **oberes** und ein **unteres Seitenband**. Der Frequenzumfang dieser Seitenbänder läßt sich genau bestimmen:

oberes Seitenband

$$f_T + 300 \text{ Hz} \dots \dots f_T + 3400 \text{ Hz},$$

unteres Seitenband

$$f_{Tr} - 300 \text{ Hz} \dots \dots \dots f_{Tr} - 3400 \text{ Hz},$$

wobei f_{Tr} die Trägerfrequenz bedeutet.

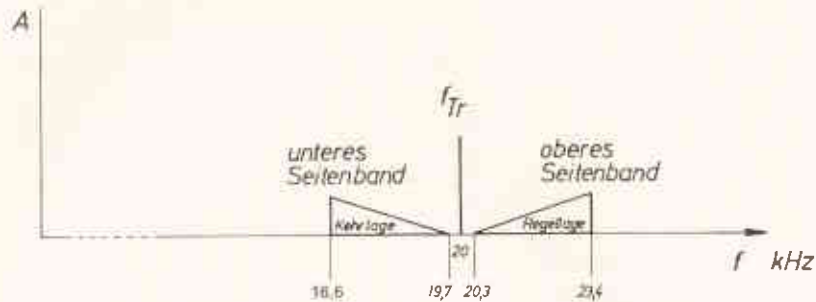


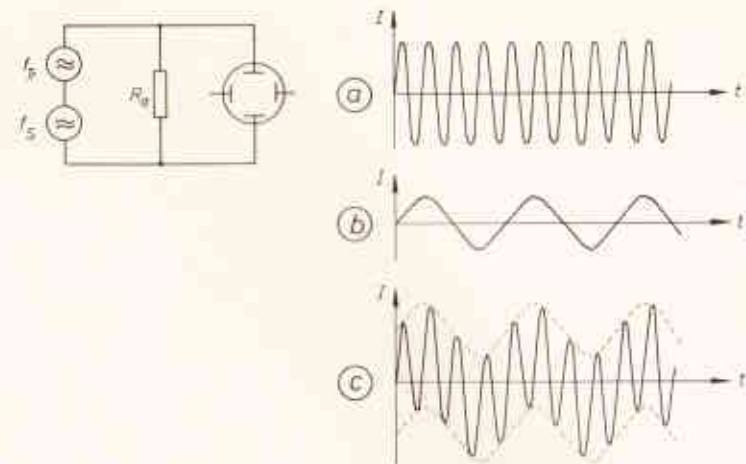
Abb. 4.5 — Darstellung der Seitenbänder

Abb. 4.5 zeigt eine zeichnerische Darstellung des Modulationsproduktes, das bei der Amplitudenmodulation einer Trägerfrequenz von 20 kHz mit einem Sprachband entsteht. Interessant ist hierbei die Anordnung der Seitenbänder. Im oberen Seitenband liegen die Frequenzen genau wie beim ursprünglichen Sprachband in aufsteigender Reihenfolge. Das obere Seitenband ist folglich eine direkte Verschiebung des Sprachbandes in die höhere Frequenzlage. Es wird genau um den Zahlenwert der Trägerfrequenz gegenüber seiner natürlichen Frequenzlage versetzt. Man spricht hier von der **Regellage** der Sprachfrequenzen im oberen Seitenband. Anders sieht es beim unteren Seitenband aus, hier liegen die Sprachfrequenzen spiegelbildlich: Die tiefste Frequenz im Sprachband (300 Hz) wird zur höchsten Frequenz im unteren Seitenband, und die höchste Frequenz im Sprachband (3400 Hz) wird zur tiefsten Frequenz im unteren Seitenband. Die Lage der Sprachfrequenzen im unteren Seitenband bezeichnet man daher als **Kehrlage**.

4.2.3. Der Modulationsvorgang

Wir wollen nun den Modulationsvorgang in seinen einzelnen Schritten näher betrachten. Der Einfachheit halber soll dabei die Trägerfrequenz f_{Tr} (z. B. 16 kHz) mit einer einzelnen sinusförmigen Signalfrequenz f_s (z. B. 4 kHz) moduliert werden.

Im ersten Schritt betrachten wir eine einfache Mischung der beiden Frequenzen f_{Tr} und f_s . Wie Abb. 4.6 zeigt, werden dazu die beiden Wechselspannungsquellen hintereinandergeschaltet und mit einem ohmschen Außenwiderstand R_a belastet. Das Frequenzgemisch wird



- a = Schwingungsbild der Trägerfrequenz f_{Tr}
 b = Schwingungsbild der Signalfrequenz f_s
 c = Schwingungsbild der Überlagerung $f_{Tr} + f_s$

Abb. 4.6 — Überlagerung zweier Schwingungen

auf dem Bildschirm eines Oszilloskops sichtbar gemacht. Es entsteht das in der Abb. 4.6c dargestellte Schwingungsbild. Dieser Schwingungsverlauf läßt sich auch zeichnerisch konstruieren, wenn man die beiden Sinuslinien der Trägerfrequenz f_{Tr} (Abb. 4.6a) und der Signalfrequenz f_s (Abb. 4.6b) Punkt für Punkt addiert. Eine Untersuchung des Frequenzgemisches mit einem frequenzabhängigen Spannungsmesser zeigt, daß nur die beiden ursprünglichen Frequenzen f_{Tr} und f_s enthalten sind. Dieses Frequenzgemisch wird daher auch als einfache **Überlagerung** zweier Sinusschwingungen bezeichnet. Eine Modulation ist noch nicht erfolgt.

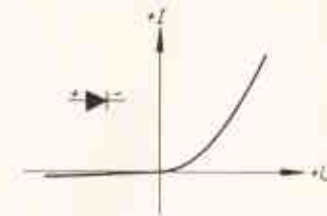
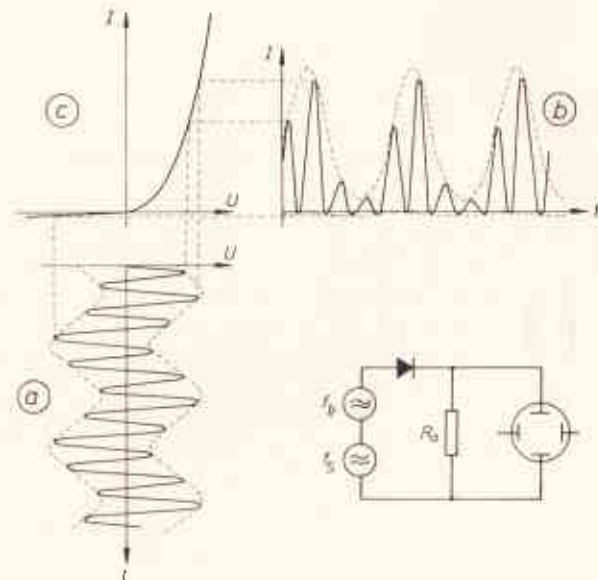


Abb. 4.7 — Kennlinie einer Diode

Der eigentliche Modulationsvorgang wird mit Hilfe einer Diode erzielt. Dazu ist es notwendig, kurz die elektrischen Eigenschaften einer Diode zusammenzufassen. Dioden haben eine Durchlaß- und eine Sperrichtung. Bei Betrieb in Durchlaßrichtung (positive Spannung)

fließt ein verhältnismäßig hoher Strom. Kleine Spannungsänderungen im positiven Bereich haben große Stromänderungen zur Folge. Bei Betrieb im Sperrbereich (negative Spannung) fließt dagegen ein vernachlässigbar kleiner Strom. Große Spannungsänderungen bewirken im Sperrbereich fast keine Stromänderungen. Diese Tatsachen lassen sich gut an der Kennlinie einer Diode (Abb. 4.7) verdeutlichen.

Im zweiten Schritt wollen wir die beiden Wechselspannungsquellen f_{Tr} und f_s wieder gemeinsam mit einem ohmschen Außenwiderstand R_a in Reihe schalten, dabei aber eine Diode in den Stromkreis einfügen (vgl. Abb. 4.8). Die beiden Frequenzen f_{Tr} und f_s bilden allein für sich eine einfache Frequenzüberlagerung. Die Diode läßt davon jedoch nur die im positiven Spannungsbereich liegenden Halbwellen durch, während im Sperrbereich die Anteile der Frequenzüberlage-



a = Schwingungsbild der Überlagerung $f_{Tr} + f_s$
b = Schwingungsbild hinter der Diode
c = Diodenkennlinie

Abb. 4.8 — Amplitudenmodulation mit einer Diode

rung weitgehend unterdrückt werden. Am Außenwiderstand R_a ist jetzt ein stark verändertes Schwingungsbild sichtbar; sein Zustandekommen wird in der Abb. 4.8 veranschaulicht. Wenn wir diesen Schwingungsverlauf mit einem frequenzabhängigen Spannungsmesser untersuchen, so stellen wir fest, daß ein Gemisch aus sehr vielen Frequenzen entstanden ist. Neben der Trägerfrequenz f_{Tr} und

der Signalfrequenz f_s , die ja beide ursprünglich schon vorhanden waren, sind neu entstanden: die doppelte Signalfrequenz $2f_s$, die doppelte Trägerfrequenz $2f_{Tr}$, die untere Seitenfrequenz $f_{Tr} - f_s$, die obere Seitenfrequenz $f_{Tr} + f_s$ und noch viele andere Frequenzen. Natürlich läßt sich dieser vielfältige Frequenzgehalt dem Oszillogramm in Abb. 4.8 b nicht ansehen, aber er ist mathematisch beweisbar und durch Messungen feststellbar. Durch Einfügen einer Diode in den Stromkreis ist eine echte Modulation erfolgt, denn die ursprüngliche Signalfrequenz f_s ist in die höheren Frequenzlagen $f_{Tr} + f_s$ und $f_{Tr} - f_s$ umgesetzt worden.

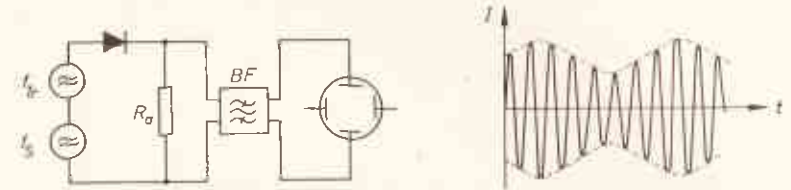


Abb. 4.9 — Amplitudenmodulation mit Frequenzbandbescheidung

Im dritten Schritt wollen wir schließlich das bisher betrachtete Modulationsprodukt in seinem Frequenzgehalt einschränken. Dazu fügen wir zusätzlich ein Bandfilter in den Stromkreis ein (vgl. Abb. 4.9). Solch ein Bandfilter hat die Eigenschaft, nur einen bestimmten Frequenzbereich wenig gedämpft durchzulassen, während die außerhalb des Durchlaßbereichs liegenden Frequenzen weitgehend unterdrückt werden. In unserem Fall soll der Durchlaßbereich so gewählt werden, daß nur die Trägerfrequenz f_{Tr} und die beiden Seitenfrequenzen $f_{Tr} - f_s$ und $f_{Tr} + f_s$ das Bandfilter passieren können. Abb. 4.9 zeigt den Schwingungsverlauf des jetzt entstandenen Modulationsproduktes. Er ist identisch mit dem in Abb. 4.3 dargestellten Bild der amplitudenmodulierten Schwingung.

Das jetzt entstandene Modulationsprodukt läßt sich bereits technisch für die Nachrichtenübertragung verwerten. Man bezeichnet dieses Verfahren als **Zweiseitenband-Übertragung**, weil neben dem Träger sowohl das untere als auch das obere Seitenband übertragen werden. Angewendet wird dieses Verfahren bei der Rundfunkübertragung im Mittelwellenbereich.

Wir hatten bisher vereinfacht angenommen, daß das zu übertragende Signal aus einer einzelnen sinusförmigen Frequenz besteht. In diesem Fall besteht die amplitudenmodulierte Schwingung aus einem Gemisch des Trägers sowie der oberen und der unteren Seitenfrequenz. Besteht dagegen die zu übertragende Nachricht aus vielen Frequenzen, z. B. aus dem Sprachband, so entstehen auch entsprechend viele Seitenfrequenzen, die zusammen als Seitenband bezeichnet

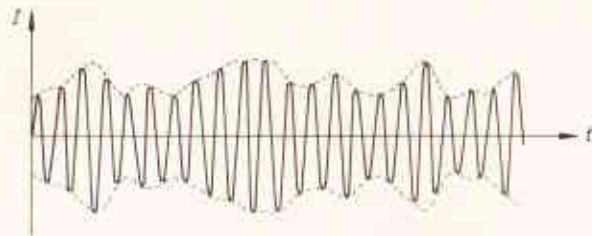


Abb. 4.10 — Amplitudenmodulation mit einem Sprachband

werden. In Abb. 4.10 ist eine amplitudenmodulierte Schwingung dargestellt, die mit einem Sprachband moduliert wurde.

4.2.4. Der Demodulationsvorgang

In der TF-Technik wird stets eine größere Anzahl verschiedener Nachrichten gleichzeitig über einen gemeinsamen Übertragungsweg übertragen. Dabei stören sich die Nachrichten gegenseitig nicht, weil sie beim Modulationsvorgang jeweils eine andere Frequenzlage erhalten haben. Am Ende der Übertragungsstrecke erfolgt zunächst eine Aufteilung der einzelnen Nachrichten durch Bandfilter. Nach der Aufteilung liegt bei jedem TF-Kanal die Nachricht in ihrer TF-

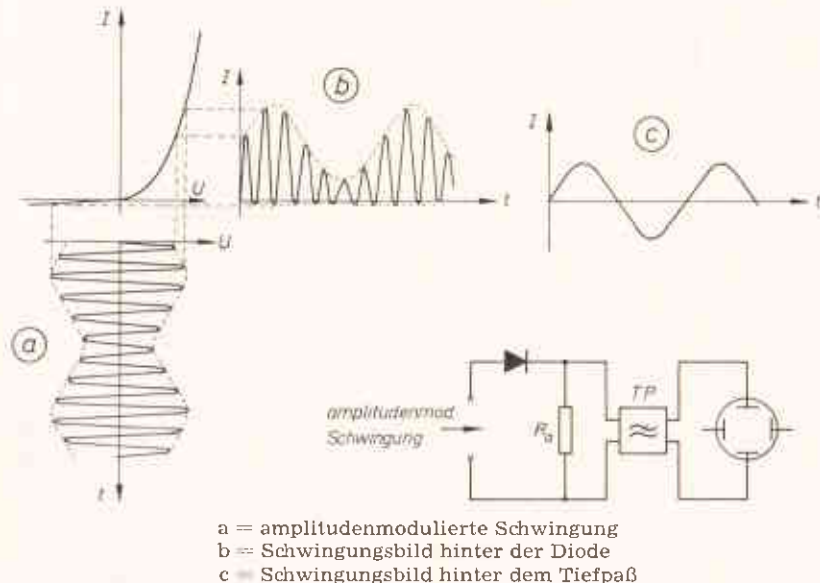


Abb. 4.11 — Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung

Frequenzlage vor. Es muß jetzt noch die Demodulation erfolgen, d. h. die Rückumsetzung in die ursprüngliche NF-Frequenzlage.

Grundsätzlich erfolgt jede Demodulation in der gleichen Art und Weise wie eine Modulation. Als Demodulationsbauteil genügt eine Diode. Wir wollen den Vorgang der Demodulation am Beispiel der amplitudenmodulierten Schwingung betrachten, bei der die Trägerfrequenz f_T (z. B. 16 kHz) mit einer Signalfrequenz f_s (z. B. 4 kHz) moduliert ist. Das auf dem Oszilloskop sichtbare Bild dieser amplitudenmodulierten Schwingung zeigt Abb. 4.3. Die Schwingung wird über eine Diode auf einen Arbeitswiderstand gegeben. Wie Abb. 4.11 zeigt, können nur die positiven Halbwellen der amplitudenmodulierten Schwingung die Diode passieren, während die negativen Halbwellen gesperrt werden. Am Arbeitswiderstand ist auf einem parallelgeschalteten Oszilloskop das in Abb. 4.11 b gezeichnete Diagramm sichtbar. Es sieht ähnlich aus wie die nach dem Modulationsvorgang entstandene Schwingung (Abb. 4.8 b). In ihr sind die Signalfrequenz f_s und sehr viele höhere Frequenzen enthalten. Eine Messung mit einem frequenzabhängigen Spannungsmesser bestätigt das. Uns interessiert bei der Demodulation aber allein die Signalfrequenz f_s , alle anderen Frequenzanteile müssen unterdrückt werden. Hierzu eignet sich ein Tiefpaß, also ein Bauelement, das nur unterhalb einer Grenzfrequenz liegende Frequenzen passieren läßt, höhere Frequenzen dagegen sperrt. Abb. 4.12 zeigt die Grundschaltung eines solchen Tiefpasses. Hinter dem Tiefpaß liegt wieder das ursprüngliche Signal in der NF-Lage vor.

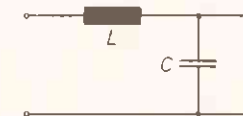


Abb. 4.12 — Tiefpaß

4.2.5. Modulation mit dem Ringmodulator

Die amplitudenmodulierte Schwingung enthält in ihrer Grundform (Abb. 4.3) die Trägerfrequenz und zweimal die zu übertragende Nachricht, nämlich jeweils im oberen und im unteren Seitenband. Aus jedem dieser beiden Seitenbänder allein läßt sich die NF-Nachricht durch Demodulation wieder zurückgewinnen. Es ist daher in der TF-Technik üblich, nur ein Seitenband zu übertragen. Das andere Seitenband, es kann das untere oder das obere sein, wird nach dem Modulationsvorgang durch Bandfilter abgeschnitten. Diese Einseitenbandübertragung hat den Vorteil, daß doppelt so viele TF-Kanäle über einen Übertragungsweg übertragen werden können wie bei der Zwei-

seitenbandübertragung, weil jeder TF-Kanal nur die halbe Bandbreite beansprucht.

Außer den beiden Seitenbändern enthält die amplitudenmodulierte Schwingung auch noch die Trägerfrequenz f_{Tr} . Da sie keinen Nachrichteninhalt hat (es ist ja lediglich eine unveränderliche Frequenz), kann auf ihre Übermittlung ebenfalls verzichtet werden. Da beim Demodulationsvorgang allerdings die Trägerfrequenz benötigt wird, muß sie in der Empfangsschaltung eines TF-Kanals wieder zugesetzt werden. Da in einem TF-Kanal lediglich ein Seitenband ohne Trägerfrequenz übertragen wird, spricht man von der Einseitenbandübertragung mit unterdrücktem Träger.

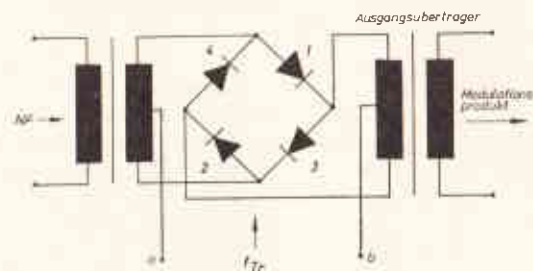


Abb. 4.13 — Ringmodulator

Zur Unterdrückung der Trägerfrequenz im Modulationsprodukt verwendet man in der TF-Technik eine besondere Schaltung, den Ringmodulator. Er besteht aus zwei Übertragern und vier Dioden (vgl. Abb. 4.13). Sein Name rührt von der ringförmigen Anordnung der Dioden her. Das zu übertragende NF-Sprachband und die Trägerfrequenz werden an zwei verschiedenen Stellen in den Ringmodulator eingespeist. Wie es dabei zu einer Modulation kommt, wollen wir in mehreren Einzelschritten betrachten. Wir nehmen der Einfachheit halber an, daß die zu übertragende Nachricht nur aus einer sinusförmigen Frequenz besteht.

Die an den Punkten a/b eingespeiste Trägerfrequenz bestimmt mit ihrer Polarität, welche der Dioden 1 ... 4 im Durchlaßbereich und welche im Sperrbereich betrieben werden. Während der positiven Halbwelle der Trägerfrequenz (+ an Punkt a; - an Punkt b) befinden sich die Dioden 1 und 2 im Durchlaßbereich und die Dioden 3 und 4 im Sperrbereich. Dieser Zustand ist in Abb. 4.14 a als Ersatzschaltbild dargestellt. Die Signalfrequenz f_s kann jetzt durch den Ringmodulator auf den Ausgang gelangen. Dabei gelangen sowohl die positive als auch die negative Halbwelle der Signalfrequenz über die Dioden, denn deren Betriebszustand (Durchlaß- oder Sperrbereich) wird ausschließlich von der jeweiligen Polarität der Trägerschwingung be-

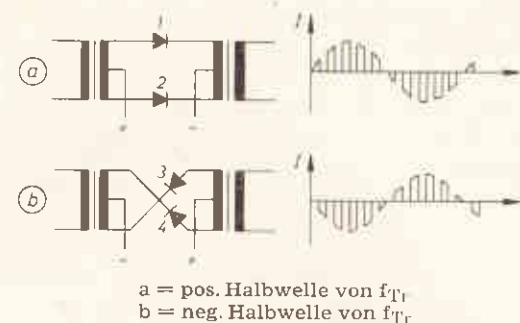
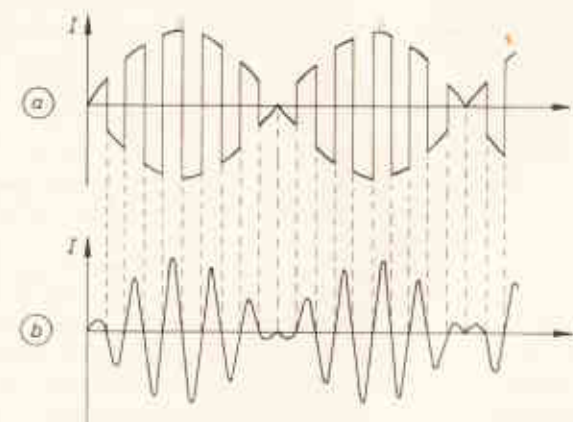


Abb. 4.14 — Wirkungsweise des Ringmodulators

stimmt. Das ist natürlich nur möglich, wenn die Spannung der Trägerfrequenz viel größer als die der Signalfrequenz ist. Wie wir auf einem Oszilloskop am Ausgang des Ringmodulators beobachten können, gelangt die Signalfrequenz gleichsam bruchstückweise über die Dioden 1 und 2 auf den Ausgang (vgl. Schwingungsbild in Abb. 4.14 a).

Während der negativen Halbwellen der Trägerschwingung (+ an Punkt b; - an Punkt a) sind die Dioden 3 und 4 durchlässig, und die Dioden 1 und 2 sind gesperrt. Abb. 4.14 b zeigt das Ersatzschaltbild dieses Zustands. Auch jetzt gelangt die Signalfrequenz bruchstückweise auf den Ausgang des Ringmodulators. Da die Dioden 3 und 4 jedoch gegensinnig zu den Dioden 1 und 2 geschaltet sind, haben die Bruchstücke der Signalfrequenz entgegengesetzte Polarität. Das Schwingungsbild ist in Abb. 4.15 b dargestellt.



a = theoretisches Schwingungsbild
b = tatsächliches Schwingungsbild am Ausgang des Ringmodulators

Abb. 4.15 — Schwingungsbilder des Ringmodulators

Die Dioden 1 und 2 sowie 3 und 4 werden durch die Trägerfrequenz im Gegentakt durchlässig geschaltet bzw. gesperrt. Das bedeutet, daß immer abwechselnd jeweils ein Bruchstück der Signalfrequenz über die Dioden 1 und 2 und dann über die Dioden 3 und 4 auf den Ausgang des Ringmodulators gelangt. Da die Diodenpaare 1 und 2 sowie 3 und 4 entgegengesetzt geschaltet sind, wechseln die Bruchstücke der Signalfrequenz f_s im Rhythmus der Trägerfrequenz f_T ihre Polarität. Das Gesamtschwingungsbild ist folglich eine Addition der Teilschwingungsbilder aus den Abb. 4.14 a und b. Abb. 4.15 a zeigt dieses Gesamtschwingungsbild. Allerdings hat es mehr theoretische Bedeutung, denn solch ein Kurvenverlauf würde nur entstehen, wenn die Dioden ideale Schalter wären. In der Praxis ergibt sich am Ausgang des Ringmodulators das in Abb. 4.15 b gezeichnete Schwingungsbild. Untersuchen wir diese Schwingung mit einem frequenzabhängigen Spannungsmesser, so stellen wir fest, daß in ihr nur noch die beiden Seitenfrequenzen enthalten sind. Es handelt sich folglich um eine amplitudenmodulierte Schwingung, bei der der Träger fehlt. Das gleiche Bild entsteht auch, wenn wir aus der amplitudenmodulierten Schwingung in ihrer Ursprungsform (Abb. 4.3) mit Hilfe eines Filters die Trägerfrequenz herausziehen.

Da die Kanäle im Einseitenbandverfahren betrieben werden, muß eines der beiden Seitenbänder durch ein dem Ringmodulator nachgeschaltetes Filter unterdrückt werden.

4.2.6. Demodulation mit dem Ringmodulator

Die auf der Empfangsseite eines TF-Kanals eintreffende Nachricht besteht nur aus einem Seitenband. Um dieses demodulieren zu können, muß ihm zunächst die Trägerfrequenz wieder zugesetzt werden. Wir wollen auch bei der Erläuterung des Demodulationsvorgangs der Einfachheit halber annehmen, daß das zu übertragende Signal aus einer sinusförmigen NF-Schwingung besteht.

Das Bauteil, das zur Demodulation benötigt wird, ist der **Ringmodulator**, den wir bereits von der Modulation her kennen. Die von der Leitungsseite her ankommende Seitenfrequenz, in der die zu übertragende NF-Nachricht steckt, und die in der Empfangsschaltung wieder zuzusetzende Trägerfrequenz werden auf den Ringmodulator gegeben. Die Einspeisung erfolgt dabei genau wie beim Modulationsvorgang (vgl. Abb. 4.13): Die empfangene Seitenfrequenz wird auf die Primärseite des Eingangsübertragers gegeben, und die Trägerfrequenz wird über die Mittelanzapfungen von Eingangs- und Ausgangsübertrager eingespeist. Im Ringmodulator werden diese beiden Frequenzen miteinander moduliert. Das Modulationsprodukt kann am Ausgangsübertrager abgenommen werden. Wir wissen, daß im Ring-

modulator zwei neue Frequenzen entstanden sind, und zwar einmal die Summe aus Trägerfrequenz und empfangener Seitenfrequenz und zum anderen die Differenz aus Trägerfrequenz und empfangener Seitenfrequenz.

Die Differenz ist identisch mit dem NF-Signal, das übertragen werden sollte. Nach Durchlaufen eines Tiefpasses, der dem Ringmodulator nachgeschaltet ist, liegt das unverfälschte NF-Signal wieder vor.

Ein Beispiel soll helfen, das Verständnis für den Demodulationsvorgang zu vertiefen. Wir nehmen an, daß eine Signalfrequenz von 1,5 kHz auf einem TF-Kanal mit einer Trägerfrequenz von 24 kHz übertragen werden soll. Im Ringmodulator der Sendeschaltung entstehen zunächst die Modulationsprodukte $24 + 1,5 = 25,5$ kHz (obere Seitenfrequenz) und $24 - 1,5 = 22,5$ kHz (untere Seitenfrequenz). Wir nehmen an, daß die untere Seitenfrequenz von 22,5 kHz über den TF-Kanal übertragen wird; die obere Seitenfrequenz wurde unmittelbar nach der Modulation durch ein Bandfilter abgeschnitten. Im Ringmodulator der Empfangsschaltung werden die Trägerfrequenz (24 kHz) und die eintreffende Seitenfrequenz (22,5 kHz) auf den Ringmodulator gegeben. Die entstehenden Modulationsprodukte sind dann: $24 + 22,5 = 66,5$ kHz und $24 - 22,5 = 1,5$ kHz. Wir erkennen also, daß am Ausgang des Ringmodulators der Empfangsschaltung das ursprüngliche NF-Signal wieder vorliegt. Es muß nur noch durch eine Tiefpaßschaltung von den unerwünschten Oberwellen befreit werden.

Auf die gleiche Art und Weise wird auch ein ganzes Seitenband demoduliert und wieder in das ursprüngliche Sprachband zurückgewandelt. An dem vorstehenden Beispiel können wir auch erkennen, wie wichtig es ist, daß die in der Empfangsschaltung zugesetzte Trägerfrequenz sehr genau mit dem Frequenzwert der Trägerfrequenz in der Sendeschaltung übereinstimmen muß.

4.3. Bildung von TF-Systemen

4.3.1. Stufenweise Modulation

Wir wollen uns zunächst nochmals die Aufgabe der TF-Technik vergegenwärtigen: Es soll eine größere Anzahl von Sprachbändern in verschiedene höhere Frequenzlagen umgesetzt und dann gemeinsam über einen geeigneten Übertragungsweg übertragen werden. Grundsätzlich wäre es möglich, jedes Sprachband in nur einem Modulationsvorgang direkt in die gewünschte Übertragungslage zu verschieben. Jedem TF-Kanal müßte dann eine eigene Trägerfrequenz

zugeordnet werden. Diese einstufige Modulation erfordert jedoch einen sehr hohen technischen Aufwand, insbesondere bei den Bandfiltern, so daß man dieses Verfahren nicht betreibt.

Das in der Praxis verwandte Modulationsverfahren ist mehrstufig. Hierbei werden die Sprachbänder in 2 oder mehr Modulationsvorgängen in die endgültige Übertragungsfrequenzlage gebracht. Diese stufenweise Modulation wollen wir im folgenden etwas genauer betrachten.

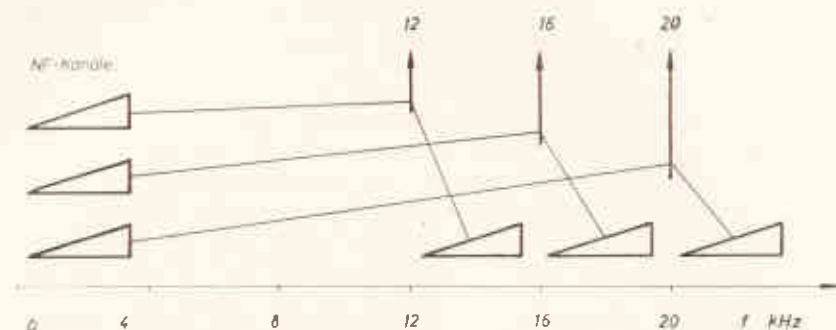


Abb. 4.16 — Bildung einer Vorgruppe aus 3 Sprachbändern

Im 1. Schritt werden 3 Sprachbänder mit Hilfe von Ringmodulatoren in eine Frequenzlage zwischen 12 und 24 kHz verschoben. Als Trägerfrequenzen werden dazu 12, 16 und 20 kHz benötigt. Von den beiden Seitenbändern, die bei der Modulation entstehen, werden jeweils die oberen verwandt, während die unteren Seitenbänder durch Filter unterdrückt werden. Die auf diese Weise entstandenen 3 Seitenbänder im Bereich zwischen 12 und 24 kHz werden **Vorgruppe** genannt. Abb. 4.16 zeigt das Frequenzschema einer Vorgruppe.

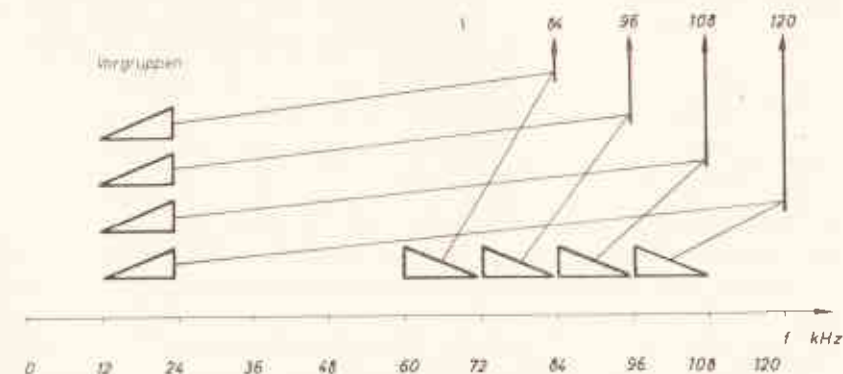


Abb. 4.17 — Bildung einer Grundprimärgruppe aus 4 Vorgruppen

Im 2. Modulationsschritt werden 4 Vorgruppen in ein Frequenzband zwischen 60 und 108 kHz umgesetzt. Dieses Bündel von 4 Vorgruppen, in dem also 12 TF-Kanäle enthalten sind, heißt **Grundprimärgruppe**. In Abb. 4.17 ist das Frequenzschema einer solchen Grundprimärgruppe angegeben. Interessant dabei ist, daß nun die unteren Seitenbänder verwertet werden, während die oberen Seitenbänder durch Filter unterdrückt werden.

Um die bei modernen TF-Systemen üblichen hohen Kanalzahlen zu erreichen (z. B. 960 TF-Kanäle), muß das Verfahren der **Gruppenumsetzung** mehrfach angewandt werden. So fügt man beispielsweise 5 Grundprimärgruppen zu einer **Grundsekundärgruppe** (Frequenzbereich 312—552 kHz) zusammen, in der dann bereits 60 TF-Kanäle enthalten sind. Zu einem 120-Kanal-TF-System werden 2 Grundsekundärgruppen zusammengefügt, wobei eine der beiden Grundsekundärgruppen durch einen weiteren Modulationsvorgang in den Frequenzbereich 12—252 kHz umgesetzt werden muß. Ein 120-Kanal-TF-System ist damit durch 4 aufeinanderfolgende Modulationsschritte entstanden; es benötigt einen Übertragungsfrequenzbereich 12—552 kHz (vgl. auch Abschn. 4.3.5.2).

In weiteren Modulationsschritten können sog. **Tertiärgruppen** mit 300 TF-Kanälen, **Quartärgruppen** mit 900 TF-Kanälen usw. gebildet werden. In allen Fällen erfolgt die Frequenzumsetzung auf die gleiche Art und Weise, nämlich mit Ringmodulatoren. Auch die Rückumsetzung erfolgt stufenweise mit Hilfe von Ringmodulatoren.

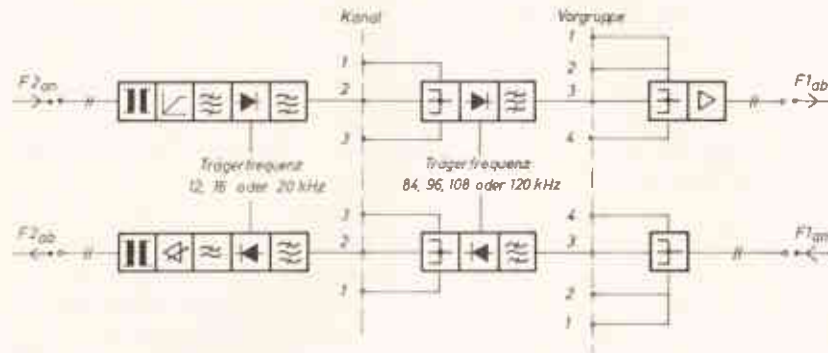
4.3.2. Endeinrichtungen

Ein TF-System besteht aus dem **Übertragungsweg**, sämtlichen zugehörigen Streckeneinrichtungen und den **Endeinrichtungen** an den beiden Endstellen des Übertragungsweges. Die Endeinrichtungen dienen zur Umsetzung der Sprachbänder in die Übertragungsfrequenzlage (Senderichtung) beziehungsweise umgekehrt (Empfangsrichtung).

Die wichtigste Endeinrichtung ist der **Kanalumsetzer (KU)**. Er ist das Grundelement aller TF-Systeme, seien es die kleinsten Systeme mit nur 12 TF-Kanälen, seien es die größten Systeme mit 10 800 TF-Kanälen. Wir wollen daher das Arbeitsprinzip der Endeinrichtungen anhand des in Abb. 4.18 dargestellten vereinfachten Blockschaltbildes eines Kanalumsetzers kennenlernen. **Der Kanalumsetzer hat die Aufgabe, 12 Sprachbänder zu einer Grundprimärgruppe zusammenzufassen** (vgl. Frequenzplan, Abb. 4.17). Dazu sind 2 Modulationsschritte erforderlich: Im 1. Schritt werden 3 Sprachbänder zu einer Vorgruppe zusammengefaßt, im 2. Schritt wird dann aus 4 Vorgruppen eine

Grundprimärgruppe gebildet. Die Demodulation wird gleichfalls in 2 Schritten durchgeführt.

Zunächst wollen wir uns die **Senderichtung** des Kanalumsetzers ansehen. Das Sprachband wird zweidrähtig (Anschlußpunkt $F2_{an}$) über einen Anpassungsübertrager eingespeist. Ein Amplitudenbegrenzer dient zur Begrenzung hoher Sprach- und Geräuschspitzen. Bevor das Sprachband dem Ringmodulator zugeführt wird, muß es erst einen Bandpaß durchlaufen, wo eine Beschneidung des Sprachbandes auf 300 bis 3400 Hz erfolgt. Im Ringmodulator erfolgt die Modulation mit Trägern von 12, 16 oder 20 kHz. Ein dem Ringmodulator nachgeschaltetes Bandfilter siebt aus dem Modulationsprodukt jeweils das obere Seitenband heraus. Die Zusammenfassung von 3 frequenzmäßig gegeneinander versetzten Sprachkanälen zu einer Vorgruppe erfolgt in einer Entkopplerschaltung. Im Kanalumsetzer werden insgesamt 4 Vorgruppen gebildet, folglich hat er 12 verschiedene Eingänge für Sprachbänder.



$F1_{an}, F1_{ab}$ = vierdrähtiger TF-Anschlußpunkt
 $F2_{an}, F2_{ab}$ = vierdrähtiger NF-Anschlußpunkt

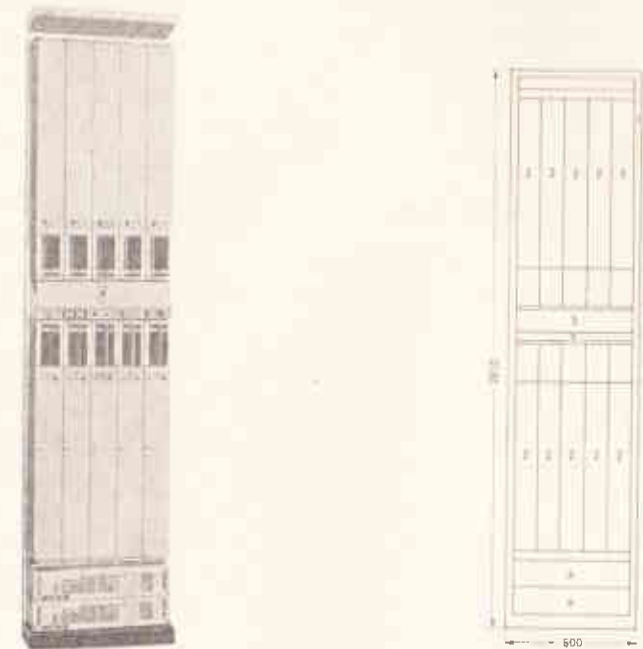
Abb. 4.18 — Vereinfachtes Blockschaltbild des Kanalumsetzers

Im 2. Modulationsschritt werden die 4 Vorgruppen mit den Trägerfrequenzen 84, 96, 108 oder 120 kHz moduliert. Die nachfolgenden Bandfilter lassen nur die unteren Seitenbänder der Modulationsprodukte durch. In diesen Seitenbändern sind nun nicht nur einzelne Sprachkanäle enthalten; in jedem dieser Seitenbänder liegen bereits 3 Sprachkanäle mit unterschiedlichen Frequenzlagen. Auch hier dient eine Entkopplungsschaltung zur Zusammenfassung der 4 frequenzmäßig gegeneinander versetzten Vorgruppen. In dem nun entstandenen Frequenzband sind 12 TF-Kanäle in verschiedenen Frequenzlagen enthalten. Dieses Frequenzband wird durch einen Gruppenverstärker auf den erforderlichen Sendepiegel gebracht, bevor es am Anschlußpunkt $F1_{ab}$ einer weiteren Umsetzstufe (z. B. einem Primärgruppenumsetzer) zugeführt werden kann.

In der **Empfangsrichtung** wird das Grundprimärgruppenband vom Anschlußpunkt $F1_{an}$ zunächst über eine Entkopplerschaltung Bandfiltern zugeführt, wo die frequenzmäßige Trennung in die 4 Seitenbänder erfolgt. Jedem dieser 4 Seitenbänder muß zur Demodulation die entsprechende Trägerfrequenz zugefügt werden. Nach der Demodulation liegen zunächst die 4 Vorgruppen vor. Sie werden über Entkopplerschaltungen und Bandfilter einer weiteren Demodulationsschaltung zugeführt, wo die Vorgruppen wieder in die ursprünglichen Sprachbänder zurückgewandelt werden. Über einen regelbaren Kanalverstärker

und einen Anpassungsübertrager gelangt das Sprachband auf den zweidrähtigen Ausgang.

Am Kanalumsetzer ist eine wesentliche Eigenschaft aller TF-Kanäle zu erkennen: Der Nachrichtenaustausch erfolgt in der Sende- und in der Empfangsrichtung getrennt. **Auf der NF-Seite hat jeder TF-Kanal einen Vierdraht-Eingang**, je eine Doppelader für die Senderichtung und für die Empfangsrichtung. Damit ist eine einfache Zusammenarbeit mit der Fernsprechnetzvermittlungstechnik (Vierdrahttechnik) möglich. Eine Fernsprechnetzvermittlungsleitung ist in der Fernvermittlungsstelle mittels einer **TF-Übertragung** abgeschlossen; der Ausgang der TF-Übertragung ist vierdrähtig. Wenn eine Verbindungsleitung über einen TF-Kanal geführt werden soll, ist eine einfache, vierdrähtige Verbindung von der TF-Übertragung zum Kanalumsetzer zu schalten (meist sind zusätzlich noch 2 Adern für die Schaltkennzeichen der Vermittlungstechnik zu schalten).



Ansicht

Gestellbestückung

- 1 = Gestellrahmen
 2 = Kanalumsetzereinsatz

- 3 = Trägerversorgungseinsatz
 4 = Stromversorgungseinsatz
 5 = Überwachungsfeld

Abb. 4.19 — Kanalumsetzer-Gestell
 (Werkbild SEL)

Abb. 4.19 zeigt die gegenwärtig übliche konstruktive Bauweise der Kanalumsetzer. Solch ein 60 cm breites und 2,6 m hohes Kanalumsetzer-Gestell ist für insgesamt 10 Kanalumsetzer aufnahmefähig; diese sind, wie aus Abb. 4.19 ersichtlich, senkrecht angeordnet (vertikale Bauweise). Da jeder Kanalumsetzer 12 Sprachkanäle zusammenfaßt, enthält das dargestellte Gestell die Endeinrichtungen für 120 TF-Kanäle. Die spezielle Bezeichnung für diese Konstruktionsart ist **Bauweise 7**.

Der Kanalumsetzer liefert eine Grundprimärgruppe, in der 12 TF-Kanäle zusammengefaßt sind. Die meisten TF-Systeme besitzen aber mehr als 12 TF-Kanäle. Dem Kanalumsetzer müssen daher meistens weitere Umsetzereinrichtungen folgen, z. B. **Primärgruppenumsetzer**, **Sekundärgruppenumsetzer**, **Quartärgruppenumsetzer**. Primärgruppenumsetzer und Sekundärgruppenumsetzer sind konstruktiv in ähnlichen Gestellen untergebracht wie die Kanalumsetzer (Abb. 4.19). Ein PGU-Gestell läßt sich auf den ersten Blick kaum von einem KU-Gestell unterscheiden.

4.3.3. Übertragungswege

4.3.3.1. Trägerfrequenzleitungen

Die Mehrfachausnutzung von Übertragungswegen in der TF-Technik ist um so wirtschaftlicher, je mehr TF-Kanäle zugleich übertragen werden können. Daher eignen sich nicht alle Übertragungswege für dieses Verfahren. Die besonderen Anforderungen, die an die in der TF-Technik verwendeten Leitungen gestellt werden, liegen erstens in der **großen Bandbreite**. Nach Möglichkeit sollen auch die höheren Frequenzen noch zu übertragen sein, d. h., sie sollen nicht zu stark gedämpft werden. Dies ist aber leider in der Praxis nicht zu erreichen, weil die Ableitungsverluste und die kapazitiven Verluste mit zunehmender Frequenz immer stärker ins Gewicht fallen. Die Hauptursache dafür ist in der Verwendung mangelhafter Isolierstoffe zu sehen, deren Verlustfaktor frequenzabhängig ist. Man kann bei jeder Leitungsart eine Grenzfrequenz festlegen, bis zu der die Übertragung ohne übermäßige Dämpfung möglich ist.

Die zweite Anforderung, die an TF-Leitungen zu stellen ist, besteht darin, Nebensprechkopplungen zwischen mehreren, in einem Kabelmantel untergebrachten Adern möglichst zu verhindern. Diese Kopplungen kommen dadurch zustande, daß stromdurchflossene Leiter elektrische und magnetische Felder erzeugen, die dann wiederum die Nachbarleiter beeinflussen.

Grundsätzlich ist zwischen zwei Kabelleitungsarten zu unterscheiden, und zwar zwischen symmetrischen Leitungen und Koaxialleitungen. Unter der **symmetrischen Leitung** versteht man eine gewöhnliche Doppelleitung innerhalb eines als Abschirmung dienenden Blei-Außenmantels. Die Bezeichnung rührt von der Tatsache her, daß beide Adern gegenüber der Erde symmetrisch sind. Symmetrische TF-Leitungen, die selbstverständlich nicht bespult sein dürfen, haben anstelle der üblichen Papier-Luft-Isolation Kunststoffisolierungen (Styroflexisolation). Dieses Isoliermaterial zeichnet sich durch eine kleinere Dielektrizitätszahl aus, wodurch die Leitungskapazität kleiner gehalten werden kann. Bei 1,3 mm Aderndurchmesser sind solche Leitungen bis zu einer Grenzfrequenz von 600 kHz nutzbar.

Schwierigkeiten bei symmetrischen Leitungen macht, insbesondere bei höheren Frequenzen, die Nebensprechkopplung. Aus diesem Grund werden Sende- und Empfangsrichtung einer symmetrischen Vierdraht-TF-Leitung gewöhnlich in zwei getrennten Kabeln geführt (**Zweikabelbetrieb**).

Koaxialleitungen können ein wesentlich breiteres Frequenzband übertragen als symmetrische Leitungen. Die Grenzfrequenz liegt hierbei weit im GHz-Bereich, die nutzbare Bandbreite wird im wesentlichen nur durch die Verstärkerabstände bestimmt. Damit ist

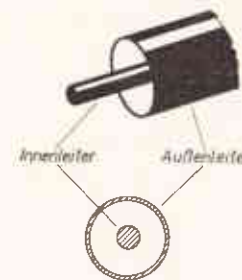
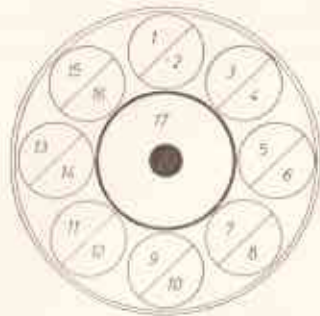


Abb. 4.20 — Koaxial-
leitung

die Bildung von viel höheren Kanalzahlen möglich, die gemeinsam über ein Koaxialpaar geleitet werden. Eine Koaxialleitung besteht aus einem **Innenleiter** und einem **rohrförmigen Außenleiter**, die durch isolierende Abstandshalter voneinander getrennt sind (vgl. Abb. 4.20). Die Bezeichnung koaxial kommt von der gemeinsamen Mittelachse, die beide Leiter haben. Bei dem sehr häufig verwendeten **Koaxialpaartyp 2,6/9,5** (auch **Normaltube** genannt) hat der Kupferinnenleiter einen Durchmesser von 2,6 mm, während der rohrförmige Kupfermantel einen Durchmesser von 9,5 mm (innen gemessen) hat. Die Wandstärke des Außenleiters beträgt 0,25 mm. Über ein solches Koaxialpaar können TF-Systeme mit bis zu 10800 Kanälen betrieben werden, eine Zahl, die bei symmetrischen Leitungen bei weitem nicht zu erzielen ist. Daneben wird häufig auch der **Koaxialpaartyp 1,2/4,4** (auch **Kleintube** genannt) eingesetzt; allerdings werden darüber kleinere TF-Systeme betrieben.

Für die TF-Übertragung wurde eine Reihe von Kabeln geschaffen, die die gemeinsame Bezeichnung Trägerfrequenzfernverbindungskabel (TFFVvk) tragen. Es gibt Kabel mit symmetrischen Leitungen, mit Koaxialleitungen und Kabel mit gemischtem Aufbau. Abb. 4.21 zeigt als Beispiel den Querschnitt durch das sehr häufig eingesetzte TF-



1 ... 16 Symmetrische Doppeladern, 1,3 mm ϕ , styroflexisoliert
17 Koaxialpaar 2,6/9,5

Abb. 4.21 — TF-Fernverbindungskabel Form 17a

Fernverbindungskabel der Form 17a. Es handelt sich um ein gemischt bestücktes Kabel, in dem in der Außenlage 16 symmetrische Doppeladern (Beipack) untergebracht sind, zusammengefaßt in 8 Stern-Viererseilen. Den Kern des Kabels bildet ein Koaxialpaar 2,6/9,5. Daneben gibt es noch eine Reihe anderer TF-Fernverbindungskabel mit Koaxialleitern. Wegen der konzentrischen Leitungsführung entstehen bei einem Koaxilpaar kein äußeres Magnetfeld und kein äußeres elektrisches Feld. Dadurch kommt es auch nicht zu elektromagnetischen Kopplungen zwischen benachbarten Koaxialpaaren. Es ist daher möglich, beide Übertragungsrichtungen einer Vierdraht-TF-Leitung im gleichen Kabel unterzubringen (**Einkabelbetrieb**).

Der Betrieb von Koaxialleitungen wird erst bei hohen Kanalzahlen wirtschaftlich. So sollten beispielsweise über ein Koaxialpaar 2,6/9,5 mindestens 1200 Kanäle und über ein Koaxialpaar 1,2/4,4 mindestens 300 Kanäle geführt werden. In vielen Verkehrsbeziehungen des SWFD werden aber diese hohen Kanalzahlen nicht benötigt. Aus diesem Grunde überwiegt derzeit noch die Zahl der kleineren TF-Systeme, die auf symmetrischen Vierdrahtleitungen betrieben werden.

Alle Kabelübertragungswege, seien es symmetrische Leitungen, seien es Koaxialpaare, haben eine wesentliche Eigenschaft: sie dämpfen die Nachrichtenübertragung. Um die TF-Technik für den Weitverkehr nutzen zu können, ist zum Ausgleich der Dämpfung der Einsatz von **Zwischenverstärkern** erforderlich.

Die Verstärker der TF-Technik müssen sehr viel größere Frequenzbänder verstärken können als die Verstärker der NF-Technik. So hat beispielsweise das TF-System V 1260 (das ist ein TF-System mit 1260 Kanälen) ein Frequenzband, das von 60 kHz bis 5516 kHz reicht. Bei diesen hohen Frequenzen, die nur durch Verwendung von Koaxialleitungen nutzbar sind, ist die Leitungsdämpfung erheblich höher als im NF-Bereich. Die Verstärkerfeldlängen müssen daher sehr viel kleiner sein; in dem genannten Beispiel muß alle 9 km ein Zwischenverstärker in die Leitung eingeschleift werden. Das größte derzeit in Betrieb befindliche TF-System mit 10800 Kanälen benötigt Zwischenverstärker im Abstand von 1,55 km. Bei der Zusammenstellung der gegenwärtig gebräuchlichen TF-Systeme in der Tabelle 4.1 sind auch die notwendigen Verstärkerfeldlängen für die verschiedenen TF-Systeme angegeben.

Bei den sehr breiten Frequenzbändern, die über TF-Leitungen übertragen werden müssen, macht sich die unterschiedliche Dämpfung der

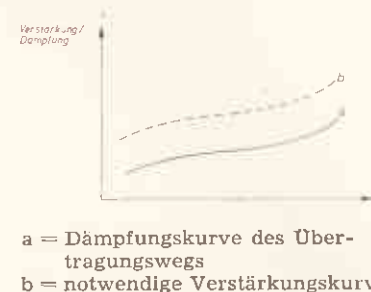


Abb. 4.22 — Verstärkungskurve eines Zwischenverstärkers

hohen und der tiefen Frequenzen besonders stark bemerkbar. Die hohen Frequenzen werden nämlich viel stärker gedämpft als die tiefen Frequenzen; ein solch frequenzabhängiger Dämpfungsverlauf ist in Abb. 4.22 (Kurve a) dargestellt. Der Zwischenverstärker muß nun in der Lage sein, entsprechend diesem Dämpfungsverlauf die hohen Frequenzen mehr zu verstärken als die niedrigen Frequenzen. Die frequenzabhängige Verstärkungskurve eines Zwischenverstärkers (Abb. 4.22, Kurve b) muß also den gleichen Verlauf haben wie die Dämpfungskurve des Übertragungsweges. Um das zu erreichen, werden frequenzabhängige Widerstände zu einem **Entzerrer** vereinigt und in die Verstärkerschaltung mit einbezogen. Mit diesen Entzerrern werden die Dämpfungsverzerrungen vermieden.

Zur Aufnahme der Zwischenverstärkereinrichtungen werden entweder **Zwischenverstärkerhäuschen** oder (bei kurzem Verstärkerabstand) **Verstärkermuffen** verwendet. Die in den unterirdischen Muffen liegenden Verstärkereinrichtungen (Unterflurverstärker) sind voll transistorisiert und wartungsfrei. Die Versorgung der Verstärker mit elektrischer Energie erfolgt über die TF-Kabel; man spricht daher von **fern gespeisten Verstärkern**.

4.3.3.2. Richtfunkstrecken

Neben Kabelwegen werden in zunehmendem Maße auch **Richtfunkstrecken** als TF-Übertragungswege genutzt. In der Richtfunktechnik liegen die auf dem Funkweg verwendeten Frequenzen zwischen 2 und 7 GHz, das sind Funkwellen im cm-Bereich. Derart hochfrequente Funkwellen haben die Eigenschaft, sich völlig gradlinig auszubreiten. Sie folgen weder der Erdkrümmung, noch können sie Hindernisse

(Hügel, Hochhäuser usw.) umgehen. Es ist deshalb erforderlich, daß zwischen Sende- und Empfangsantenne Sichtverbindung besteht. Die **Entfernung zwischen zwei Antennen** (Funkfeld genannt) ist **deshalb gewöhnlich auf etwa 50 km begrenzt**. Natürlich müssen Richtfunkverbindungen wesentlich weiter gehen, wenn sie als TF-Übertragungswege nutzbar sein sollen. Eine Richtfunkverbindung setzt sich daher meistens aus mehreren Funkfeldern zusammen. Am Ende eines Funkfeldes werden die Funkwellen von einer Relaisstation empfangen, verstärkt und auf das nächste Funkfeld gegeben.

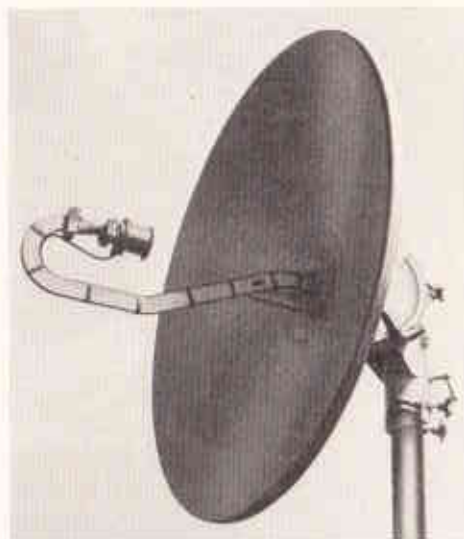


Abb. 4.23 — Richtfunkantenne

Zur Sendung bzw. zum Empfang dienen parabolförmige Antennen, die die Funkwellen sehr stark bündeln. Sie sind meistens auf Türmen, Hochhäusern, Bergkuppen usw. untergebracht, damit eine maximale Reichweite erzielt wird. Abb. 4.23 zeigt eine solche Richtfunkantenne. Funkstörungen, wie sie in anderen Frequenzbereichen häufig auftreten, haben in der Richtfunktechnik nur geringe Bedeutung. Man kann sogar behaupten, daß Richtfunkverbindungen im Hinblick auf Güte, Sicherheit und Konstanz den Kabelverbindungen gleichwertig sind. Es ist jedenfalls einer Fernsprechnachricht nicht anzumerken, ob sie einen TF-Kanal durchlaufen hat, der über eine Richtfunkstrecke übertragen wurde, oder einen TF-Kanal, der über eine Kabelstrecke geführt wurde. Gebräuchliche Richtfunksysteme sind für die Übertragung von 120, 300, 960 oder 1800 TF-Kanälen eingerichtet.

4.3.3.3. TF-Grundleitungen

Der Übertragungsweg zwischen zwei Endstellen eines TF-Systems heißt **TF-Grundleitung**. Zu ihr gehören neben den Kabeladern auch Leitungs-Sendeverstärker und Leitungs-Empfangsverstärker, Anpassungsübertrager sowie alle Zwischenverstärker. Eine TF-Grundleitung kann über symmetrische Leitungen, Koaxialpaare oder auch über Richtfunkstrecken geführt sein. Sie kann aber auch aus mehreren hintereinandergeschalteten **TF-Grundleitungsabschnitten** bestehen. So können beispielsweise in einer TF-Grundleitung eine verstärkte Kabelleitung mit einer Richtfunkverbindung zusammengeschaltet sein.

4.3.4. Betriebsarten der TF-Systeme

Jeder TF-Kanal ist grundsätzlich in beiden Richtungen zum Nachrichtenaustausch nutzbar. Das bedeutet, daß jeder TF-Kanal zwei getrennte Übertragungsrichtungen haben muß: eine **Senderichtung** und eine **Empfangsrichtung**. Die NF-Eingänge, an denen das Sprachband eingespeist beziehungsweise wieder abgegeben wird, sind bei allen TF-Kanälen **vierdrähtig**. Auf dem Übertragungsweg (zwischen den Endstellen des TF-Systems) können die beiden Übertragungsrichtungen auf zwei verschiedene Arten verwirklicht werden: erstens durch **Zweidrahtleitungen**, bei denen beide Übertragungsrichtungen gemeinsam über eine Doppelader geleitet sind, und zweitens durch **Vierdrahtleitungen**, bei denen die Übertragungsrichtungen auf getrennten Doppeladern geführt sind.

4.3.4.1. Zweidraht-TF-Systeme

Als Übertragungsweg eines TF-Systems wird **eine symmetrische Doppelader** verwendet, über die gemeinsam beide Übertragungsrichtungen geführt werden. Dabei ist es aber nicht möglich, Sender und Empfänger eines TF-Kanals unmittelbar an die Leitung anzuschließen, denn dann würde ein Sender über den Anschlußpunkt auf den eigenen Empfänger zurückwirken. Gabelschaltungen zur Trennung der beiden Richtungen des Nachrichtenflusses, wie wir sie in der NF-Technik kennengelernt haben (Abschn. 3.4.1), sind in der TF-Technik nicht anwendbar. Die Nachbildungen lassen sich bei den breiten Frequenzbändern, die über die TF-Leitungen übertragen werden müssen, nicht genügend genau herstellen. Um die unerwünschte Rückkopplung zu vermeiden, gibt man der Senderichtung eines TF-Kanals eine andere Frequenzlage als der Empfangsrichtung. Man kann dann die beiden Übertragungsrichtungen durch geeignete

Filter, Richtungsweichen (RW) genannt, voneinander trennen. Auf diese Weise ist sichergestellt, daß auf den Empfänger nur die vom fernen Sender stammenden Nachrichten gelangen; die vom eigenen

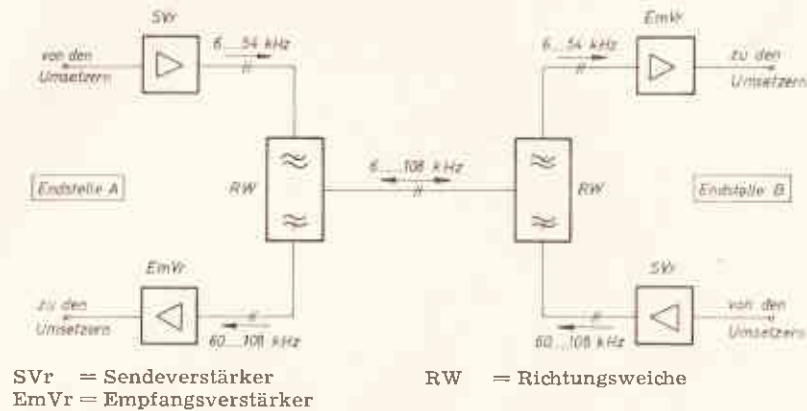


Abb. 4.24 — Zweidrahtübertragungsweg

Sender kommenden Nachrichten werden durch die Richtungsweiche vom eigenen Empfänger ferngehalten.

Abb. 4.24 zeigt das Prinzip eines unverstärkten Zweidrahtübertragungsweges mit Richtungsweichen bei den Endstellen. Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein TF-System mit 12 TF-Kanälen. Von der Endstelle A aus werden die Senderrichtungen der 12 Kanäle im Frequenzbereich 6 ... 54 kHz und die Empfangsrichtungen der gleichen Kanäle im Frequenzbereich 60 ... 108 kHz betrieben. Bei der Endstelle B müssen natürlich Sender und Empfänger im umgekehrten Frequenzbereich arbeiten. Auf dem Zweidrahtübertragungsweg benötigen die 12 Kanäle ein Übertragungsband von 6 ... 108 kHz.

Müssen Zweidrahtleitungen verstärkt werden, so benötigt man für Sende- und Empfangsrichtung getrennte Zwischenverstärker, weil ein Verstärker ja nur in einer Richtung arbeiten kann. Vor und hinter jedem Zwischenverstärker müssen die beiden Übertragungsrichtungen mittels Richtungsweichen aufgeteilt werden.

Wegen der verschiedenen Frequenzen für die beiden Übertragungsrichtungen heißt diese Betriebsart **Zweidraht-Frequenzgetrenntlage-Verfahren**. TF-Systeme, die so betrieben werden, tragen den **Kennbuchstaben Z**. Ein TF-System Z 12 ist beispielsweise ein System mit 12 TF-Kanälen, das im Zweidraht-Frequenzgetrenntlage-Verfahren arbeitet. **Z-Systeme werden nur im Nahbereich eingesetzt.**

4.3.4.2. Vierdraht-TF-Systeme

Für den Übertragungsweg werden **zwei symmetrische Doppeladern** oder **zwei Koaxialleitungen** verwandt, über die die beiden Übertragungsrichtungen getrennt geführt werden. Da Sender und Empfänger bei diesem Verfahren nirgends miteinander Berührung haben, besteht auch keine Gefahr der direkten gegenseitigen Beeinflussung von Sende- und Empfangsvorgang innerhalb eines TF-Kanals. Aus diesem Grunde ist es möglich, Sende- und Empfangsrichtung eines TF-Kanals in der gleichen Frequenzlage zu betreiben. Richtungsweichen bei den beiden Endstellen sowie bei den Zwischenverstärkern sind natürlich nicht erforderlich.

Wegen der gleichen Frequenzlagen, die die beiden Übertragungsrichtungen eines TF-Kanals haben, heißt diese Betriebsart **Vierdraht-Frequenzgleichlage-Verfahren**. Abb. 4.25 zeigt das Prinzip dieser Betriebsart. In dem gewählten Beispiel werden 60 TF-Kanäle im Frequenzbereich 12 ... 252 kHz über einen Vierdrahtübertragungsweg geleitet. Erforderliche Zwischenverstärker (in diesem Beispiel alle 18 km) können unmittelbar in die Leitung eingeschleift werden.

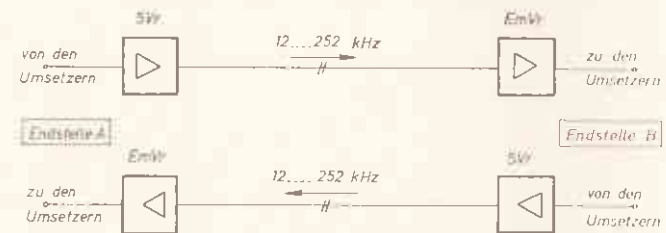


Abb. 4.25 — Vierdrahtübertragungsweg

TF-Systeme, die nach diesem Verfahren arbeiten, haben den **Kennbuchstaben V**. Es bedeutet z. B. die Bezeichnung V 120, daß es sich um ein TF-System mit 120 TF-Kanälen handelt, das im Vierdraht-Frequenzgleichlage-Verfahren betrieben wird. **Alle modernen Weitverkehrssysteme mit hohen Kanalzahlen sind V-Systeme.**

Ein Vergleich zwischen Zweidraht- und Vierdrahtleitungen zeigt, daß die Leitungsausnutzung in beiden Fällen gleich ist. Zwar benötigt man beim Vierdrahtverfahren die doppelte Leitungszahl; wegen des Frequenzgleichlage-Verfahrens lassen sich aber bei gleicher Frequenzbandbreite des Übertragungsweges auch doppelt so viele TF-Kanäle übertragen wie beim Zweidrahtverfahren.

4.3.5. Übersicht über gebräuchliche TF-Systeme

4.3.5.1. Zweidrahtsysteme

Zweidrahtsysteme werden ausschließlich im Nahbereich eingesetzt. Es gibt die beiden **Systeme Z 12** und **Z 24**, letzteres hat jedoch nur regionale Bedeutung. Beim System Z 12 werden 12 TF-Kanäle im Frequenzbereich 6 ... 108 kHz übertragen, während das System Z 24 für seine 24 TF-Kanäle ein Frequenzband 6 ... 222 kHz benötigt. Beide Systeme arbeiten im Frequenzgetrenntlage-Verfahren.

Als Übertragungswege dienen unbespulte oder nachträglich entspulte NF-Fernleitungen. Bei kurzen Entfernungen (bis maximal 36 km) können die Z-Systeme ohne Zwischenverstärker arbeiten. Bei größeren Entfernungen müssen in regelmäßigen Abständen Zwischenverstärker eingesetzt werden, z. B. bei 0,9 mm Adern etwa alle 20 km oder bei 1,4 mm Adern etwa alle 35 km. Der jeweilige Verstärkerabstand muß also stets den vorhandenen Übertragungswegen angepaßt sein. Da Z-Systeme jedoch nur im Nahbereich betrieben werden, liegen im allgemeinen höchstens 3 Zwischenverstärker im Zuge der Leitung.

4.3.5.2. Vierdrahtsysteme für symmetrische Leitungen

Vierdrahtsysteme werden im Weitverkehr eingesetzt. Die Entwicklung moderner V-Systeme nahm 1950 mit dem **V 60-System** ihren Anfang. Hierbei können 60 TF-Kanäle im Frequenzbereich 12 ... 252 kHz (= Frequenzumfang einer Sekundärgruppe) übertragen werden, und zwar—wie bei allen Vierdrahtsystemen—im Frequenzgleichlage-Verfahren. Als Übertragungswege werden symmetrische, papierisolierte Cu-Vierdrahtleitungen (1,2 mm Aderndurchmesser) in speziellen TF-Fernkabeln eingesetzt. Zur Vermeidung von Nebensprechkopplungen werden die Doppeladern der Sende- und der Empfangsrichtung in getrennten Kabeln geführt (Zweikabelbetrieb). Zwischenverstärker müssen im Abstand von jeweils 18 km eingeschleift werden. Gegenwärtig werden keine V 60-Systeme mehr neu geplant. Sie sind jedoch noch häufig im Betrieb anzutreffen, und man stellt auch die vorhandenen Endeinrichtungen nach und nach von der Röhrentechnik auf die Transistortechnik um.

Durch Einsatz verbesserter TF-Fernkabel war es möglich, ohne Vergrößerung der Verstärkerabstände (18 km) einen doppelt so großen Frequenzbereich zu übertragen wie beim V 60-System. Seit 1954 betreibt man daher auf symmetrischen Cu-Vierdrahtleitungen (styroflexisoliert, 1,3 mm Aderndurchmesser) das **TF-System V 120**. Dabei können im Bereich 12 ... 552 kHz insgesamt 120 TF-Kanäle betrieben werden. Die zur Bildung eines solchen Systems in den Endstellen

erforderlichen Umsetzereinrichtungen wurden bereits im Abschn. 4.3.2 als Beispiel erläutert.

Bei symmetrischen Leitungen lassen sich Nebensprechkopplungen nur bis etwa 600 kHz ausgleichen. Bei höheren Frequenzen würden die in den Nachbaradern induzierten Nebensprechgeräusche den Betrieb stören. **Über symmetrische Leitungen können folglich nur TF-Systeme mit höchstens 120 Kanälen geführt werden.**

4.3.5.3. Vierdrahtsysteme für Koaxialleitungen

Bei Koaxialleitungen tritt das Problem der Nebensprechkopplung nicht auf. Es können daher sehr viel größere Übertragungsbänder gebildet werden als bei den symmetrischen Leitungen. Folglich haben die über Koaxialleitungen betriebenen TF-Systeme auch viel höhere Kanalzahlen. Das **System V 1260** (seit 1961 im Einsatz) belegt das Frequenzband 60 ... 5516 kHz. Wie schon aus der Bezeichnung hervorgeht, können 1260 TF-Kanäle über eine Vierdrahtleitung zugleich übertragen werden. Als Übertragungswege werden Koaxialpaare 2,6/9,5 (Normaltuben) verwendet, wobei der Verstärkerabstand 9 km beträgt. Sehr häufig wird das TF-Fernkabel der Form 17a genutzt, dessen Querschnitt in Abb. 4.21 dargestellt ist. In diesem Kabel können auf den 16 symmetrischen Doppeladern entsprechend viele V 120-Systeme betrieben werden, während im Koaxialkern das System V 1260 übertragen wird. Für die beiden Übertragungsrichtungen werden 2 getrennte Kabel Form 17a benötigt. Bei Verwendung anderer Koaxialkabelformen mit mehr als einem Koaxialpaar können natürlich beim System V 1260 beide Übertragungsrichtungen im gleichen Kabel liegen (Einkabelbetrieb).

Noch mehr Kanäle lassen sich im **TF-System V 2700** übertragen, das als Übertragungsweg 2 Koaxialpaare 2,6/9,5 nutzt. Das Übertragungsband liegt bei 312 ... 12336 kHz. Bei diesen hohen Übertragungsfrequenzen sind bereits Verstärker im Abstand von jeweils 4,65 km erforderlich. Moderne, transistorbestückte Endeinrichtungen für das System V 2700 sind seit 1968 in Betrieb.

Seit 1971 werden Versuchsbetriebe mit dem **System V 10800** auf 2 Koaxialpaaren 2,6/9,5 durchgeführt. Bei einem Übertragungsband von 4,3 ... 60 MHz schrumpft der Verstärkerabstand auf 1,55 km zusammen. Die weitere Entwicklung zielt auf die Bildung noch größerer Kanalzahlen hin. Es existieren schon Laborversuchsgeräte für ein V 30 000-System.

Koaxialpaare 2,6/9,5 sind erst dann wirtschaftlich eingesetzt, wenn mindestens 1200 TF-Kanäle oder mehr auf einer Vierdrahtleitung betrieben werden. Für Verkehrsbeziehungen, in denen kleinere

Tabelle 4.1: Kenndaten gebräuchlicher TF-Systeme

Bezeichnung des TF-Systems	Übertragungsbereich	Kanalzahl	Leistungsart	Verstärkerabstand
Z 12	6 ... 108 kHz	12	NF-Leitung	20 ... 35 km
Z 24	6 ... 222 kHz	24	NF-Leitung	20 ... 35 km
V 60	12 ... 252 kHz	60	Symmetrische TF-Leitung, 1,2 mm ϕ , papierisoliert	18 km
V 120	12 ... 552 kHz	120	Symmetrische TF-Leitung, 1,3 mm ϕ , styroflexisoliert	18 km
V 300	60 ... 1300 kHz	300	Koaxialleitung 1,2/4,4	8 km
V 960	60 ... 4028 kHz	960	Koaxialleitung 1,2/4,4 oder Koaxialleitung 2,6/9,5	4 km 9 km
V 1260	60 ... 5516 kHz	1260	Koaxialleitung 2,6/9,5	9 km
V 2700	312 ... 12336 kHz	2700	Koaxialleitung 2,6/9,5	4,65 km
V 10800	4,3 ... 60 MHz	10800	Koaxialleitung 2,6/9,5	1,55 km

Kanalzahlen benötigt werden, ist es günstiger, Koaxialpaare 1,2/4,4 (Kleintuben) als Übertragungswege zu verwenden. Es gibt das System V 300 (60 ... 1300 kHz), das einen Verstärkerabstand von 8 km erfordert, und das System V 960 (60 ... 4028 kHz), bei dem alle 4 km Zwischenverstärker erforderlich sind. Das System V 960 wird aber auch gelegentlich auf Koaxialpaaren 2,6/9,5 eingesetzt, wobei sich dann der Verstärkerabstand auf 9 km vergrößert.

In Tabelle 4.1 sind die derzeit gebräuchlichen TF-Systeme mit ihren wichtigsten Daten noch einmal zusammengestellt.

5. Fernschreib- und Datenübertragungstechnik

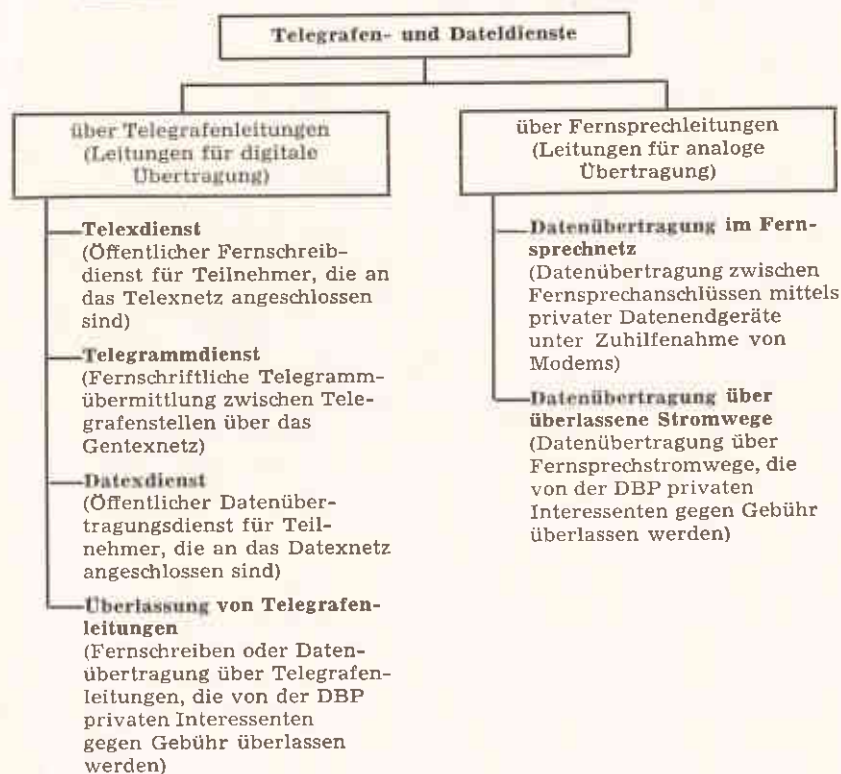
5.1. Analoge und digitale Nachrichtenübertragung

In den einleitenden Ausführungen des Abschnitts „Leitungstechnik“ (Abschnitt 2.1) haben wir gesehen, welche verschiedenartigen Nachrichten über die Fernmeldeübertragungswege der DBP übermittelt werden können. Diese Nachrichtenarten sollen jetzt daraufhin untersucht werden, welche Veränderungen mit ihnen einmal im Sender und zum anderen im Empfänger einer Fernmeldeanlage vorgenommen werden. Man kann dabei grundsätzlich zwei verschiedene Übertragungsmethoden unterscheiden, und zwar die „vorlagengetreue“ und die „künstliche“ Übertragung. Ein Beispiel für die vorlagengetreue Übertragung ist das Fernsprechen: Die „Vorlagen“ sind Schallwellen; sie werden im Sender der Fernmeldeanlage in elektrische Wellen umgewandelt, die in ihrer Frequenz genau der Vorlage entsprechen. Im Empfänger der Fernmeldeanlage muß natürlich die entgegengesetzte Umwandlung erfolgen. Weil die elektrischen Wellen hinsichtlich der Frequenz und der Dynamik genau den Schallwellen entsprechen, bezeichnet man dieses Verfahren als **analoge Übertragung**. Weitere Beispiele für die analoge Nachrichtenübertragung sind die Rundfunkübertragung, das Übertragen von festen Bildern (Bildtelegrafie) und das Übertragen von bewegten Bildern (Fernsehen). Wesentliches Merkmal der analogen Übertragung ist, daß die Nachrichten stufenlos übertragen werden. Ein Übertragungswege für analoge Übertragung muß also — zumindest in gewissen Bereichen — alle Frequenzen und alle Amplituden (Spannungswerte) übertragen können. Über einen TF-Kanal können beispielsweise alle Frequenzen zwischen 300 und 3400 Hz übertragen werden, also die wesentlichen Frequenzen, die in der menschlichen Sprache enthalten sind. Auch die Amplitudenwerte der Sprachfrequenzen können groß oder klein sein, denn man kann ja ein sehr lautes Ferngespräch führen oder aber ein sehr zartes. Ein TF-Kanal ist folglich ein Analog-Übertragungswege.

Die andere Übertragungsmethode haben wir oben als „künstlich“ bezeichnet. Hierbei wird die Nachricht zunächst im Sender in einzelne **Nachrichtenschritte** umgewandelt, die dann nacheinander (in einigen Fällen auch parallel) über den elektrischen Übertragungswege übermittelt und beim Empfänger wieder in die ursprüngliche Nachricht zurückgewandelt werden müssen. Wegen der schrittweisen Übermittlung bezeichnet man diese Methode als **digitale Übertragung**.

(engl. digit = Ziffer, digital = schrittweise, stufenweise). Bei der digitalen Übertragung muß zwischen Sender und Empfänger einer Fernmeldeanlage eine genaue Verabredung darüber getroffen werden, was die einzelnen Nachrichtenschritte bedeuten, damit der Empfänger die eintreffenden Schritte wieder in die ursprüngliche Nachricht zurückwandeln kann. Man spricht wegen dieser notwendigen Verabredung auch von der **codierten** Nachrichtenübertragung. Wesentliches Merkmal der digitalen Übertragung ist also, daß die Nachrichten abgestuft und codiert übermittelt werden. Ein für digitale Übertragung eingerichteter Übertragungsweg (z. B. ein Wechselstrom-Telegrafie-Kanal) kann also nur Nachrichtenschritte mit ausgewählten Frequenzen und Amplitudenstufen übertragen, nicht aber Fernsprechnachrichten, weil diese einen stufenlosen Übertragungsweg erfordern. Umgekehrt lassen sich aber über analoge Übertragungswege (z. B. Fernsprechleitungen) digitale Signale übermitteln, wobei allerdings meist beim

Tabelle 5.1: Die wichtigsten Telegrafien- und Datendienste der DBP



Sender und beim Empfänger eine zusätzliche digitale Übertragungseinrichtung (Modem) erforderlich ist.

Die Geschichte des elektrischen Fernmeldewesens begann in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts zunächst mit digitalen Übertragungsverfahren. Eines der bekanntesten war die 1837 erfundene Morsetelegrafie. Die Nachrichten wurden dabei durch kurze und lange Stromschritte übermittelt, die nach einem bestimmten Schema — dem Morsecode — angeordnet werden mußten. Auch heute ist das Morseverfahren bei Amateurfunkern noch gebräuchlich.

Die digitale Nachrichtenübertragung findet heute in der „klassischen Telegrafie“ Anwendung, womit die **Fernschreibtechnik** gemeint ist. In zunehmendem Maße gewinnt jedoch auch die **digitale Datenübertragung** an Bedeutung. Der Unterschied zwischen Fernschreiben und Datenübertragung ist nicht sehr groß. Man kann vielleicht anführen, daß beim Fernschreiben die Nachrichten im allgemeinen unmittelbar zum Lesen bestimmt sind, während bei der Datenübertragung die digitalen Nachrichten meist von einer Datenverarbeitungsanlage stammen oder für eine solche bestimmt sind. Ein anderes Unterscheidungsmerkmal ist die Übertragungsgeschwindigkeit: Die Datenübertragung spielt sich gewöhnlich in höheren Geschwindigkeitsbereichen ab als das Fernschreiben. Im wesentlichen sind die technischen Grundlagen für Fernschreiben und Datenübertragung jedoch gleich.

Die DBP bietet eine Reihe von Diensten zur fernschriftlichen Nachrichtenübermittlung und zur Datenübertragung an, die von der Öffentlichkeit in Anspruch genommen werden können. Diese sind unter der Bezeichnung **Telegrafien- und Datendienste** zusammengefaßt. Datel (engl. data telecommunication) ist ein international gebräuchliches Kunstwort für Datenübertragung über Fernmeldewege. Die wichtigsten Telegrafien- und Datendienste der DBP sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt.

5.2. Bildung von Binärschritten

5.2.1. Binärzustände

Im Abschnitt 5.1 haben wir gelernt, daß beim Fernschreiben die Nachrichten schrittweise übermittelt werden. Damit zwischen Sender und Empfänger einer Fernschreibverbindung ein Nachrichtenaustausch möglich wird, muß als erstes eine Verabredung getroffen sein, wieviel Amplitudenstufen die einzelnen Schritte annehmen können. Diese verabredeten Amplitudenstufen heißen **Kennzustände**. Sehr einfache Telegrafien- und Datenendgeräte (z. B. Fernschreibapparate) lassen sich bauen, wenn man die Zahl der Kennzustände auf zwei begrenzt. In diesem Fall heißen die Kennzustände **Binärzustände** (binär = zwei-

wertig). Der wichtige Begriff binär, der in der Telegrafie und Datenübertragung in sehr vielen Zusammenhängen verwandt wird, bedeutet also, daß eine Entscheidung zwischen zwei vereinbarten Kennzuständen getroffen werden kann.

Die Binärzustände lassen sich elektrisch auf sehr verschiedene Art und Weise darstellen. Die einfachste Art der Bildung von Binärzuständen ist die **Einfachstromtastung** mit den Binärzuständen **Strom** und **kein Strom**. Diese Art der Binärzustandsbildung wird beispielsweise bei den Fernschreibapparaten angewandt. Die Binärzustände lassen sich sehr leicht mit Hilfe eines Ruhekontakts bilden: Bei geschlossenem Kontakt wird der Binärzustand Strom und bei geöffnetem Kontakt der Binärzustand kein Strom erzeugt. Neben der Einfachstromtastung gibt es noch eine Reihe weiterer Möglichkeiten, Binärzustände elektrisch darzustellen. Es sei vor allem auf die Wechselstromtastarten hingewiesen, die bei der Übertragung von Binärschritten über größere Entfernungen eine Rolle spielen (WT-Kanäle).

Als Bezeichnung für die Binärzustände hat man international die Begriffe **Startpolarität** mit dem Kennbuchstaben **A** und **Stoppolarität** mit dem Kennbuchstaben **Z** eingeführt. Die Bezeichnungen Start ... und Stop ... erklären sich aus der Arbeitsweise der Fernschreibapparate. Bei der Einfachstromtastung ist dem Kennzustand Strom die Binärbezeichnung Stoppolarität und dem Kennzustand kein Strom die Binärbezeichnung Startpolarität zugeordnet. Zu erwähnen ist noch, daß bei der Datenübertragung meist anstelle der Kennbuchstaben A bzw. Z die Binärziffern 0 bzw. 1 verwandt werden.

In der Tabelle 5.2 sind die vorstehend erläuterten Bezeichnungen noch einmal zusammengefaßt.

Tabelle 5.2: Binärzustände

Bezeichnung der Binärzustände	Startpolarität	Stoppolarität
Kennbuchstaben	A	Z
Binärziffern	0	1
Einfachstromtastung	Kein Strom	Strom

5.2.2. Binärschritte

Ein beim Fernschreiben oder bei der Datenübertragung verwandter Schritt, der zwei verschiedene Kennzustände (z. B. Strom oder kein Strom) annehmen kann, ist ein **Binärschritt**. Er bildet das kleinste Element bei der telegrafischen Nachrichtenübermittlung. Seine zeitliche Länge T_S wird in ms gemessen. Je nach dem Anwendungsbereich haben die Schritte verschiedene Längen; im Telexnetz (= Öffentliches Fernschreibnetz) arbeitet man beispielsweise mit $T_S = 20$ ms, wäh-

rend im Datexnetz (= Öffentliches Datenübertragungsnetz) die Schrittlänge $T_S = 5$ ms verwandt wird. Wichtig ist, daß innerhalb eines Anwendungsbereichs stets mit der festgelegten Schrittlänge gearbeitet wird; kürzere Signale als T_S werden nicht benutzt.

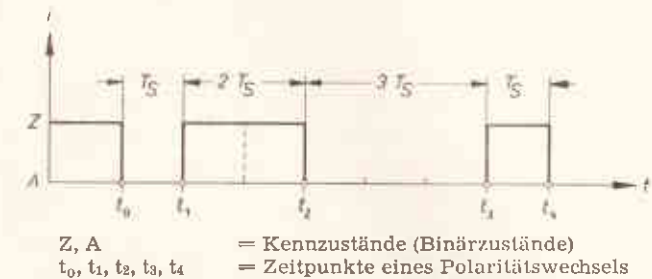


Abb. 5.1 — Bildung von Binärschritten

In Abb. 5.1 ist eine Folge von mehreren Binärschritten dargestellt, wie sie beispielsweise von einem Fernschreibapparat erzeugt wird. Man erkennt, daß häufig Schritte mit gleicher Polarität aufeinanderfolgen. In dem gezeichneten Beispiel haben die beiden Schritte zwischen t_1 und t_2 den Kennzustand Z (Strom), während die nächsten drei Schritte alle den Kennzustand A (kein Strom) haben. Ein Telegrafenempfänger tastet diese Schritte der Reihe nach ab und kann danach die ursprüngliche Nachricht, z. B. einen Buchstaben, zum Ausdruck bringen.

Der Informationsinhalt eines Binärschritts ist ein **Bit**; diese Bezeichnung wird vorwiegend bei der elektronischen Datenverarbeitung und bei der Datenübertragung verwendet. In Abb. 5.1 folgen zwischen dem Beginn des Strom-Zeit-Diagramms und dem Zeitpunkt t_1 insgesamt acht Binärschritte aufeinander, vier Stromschritte und vier Kein-Strom-Schritte. Der Informationsinhalt dieser Schrittfolge ist also acht Bit.

5.2.3. Maße für Binärschritte

Eines der wichtigsten Maße in der Telegrafentechnik ist die **Schrittgeschwindigkeit** v_S . Man versteht darunter die Zahl der Schritte, die maximal je Sekunde übermittelt werden kann. Wenn die zeitliche Länge T_S eines Schrittes festgelegt ist, dann läßt sich daraus leicht die Schrittgeschwindigkeit berechnen nach folgender Formel:

$$v_S = \frac{1}{T_S} \text{ Baud}$$

Als Maßeinheit für die Schrittgeschwindigkeit wurde nach dem Franzosen Baudot, der im vorigen Jahrhundert einen der ersten Telegrafengeräte gebaut hat, das **Baud** (sprich bood) eingeführt, abgekürzt **Bd**. Die Angabe 75 Baud bedeutet also, daß maximal 75 Schritte je Sekunde übermittelt werden können.

Beispiele:

- a) Im Telexnetz werden die Fernschreibnachrichten mit Binärschritten übertragen, die einheitlich 20 ms ($= 20 \cdot 10^{-3}$ s) lang sind. Wie groß ist die Schrittgeschwindigkeit?

Lösung:

$$v_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = \frac{10^3}{20} = 50 \text{ Baud}$$

- b) Bei einer Datenübertragung werden die Daten mit einer Schrittgeschwindigkeit von 2400 Baud übertragen. Wie lang sind die einzelnen Schritte?

Lösung:

2400 Baud bedeutet, daß 2400 Schritte hintereinander in der Sekunde übertragen werden können. Dann ist ein einzelner Schritt $\frac{1}{2400}$ Teil einer Sekunde lang, also

$$T_s = \frac{1}{2400} \text{ s} = \frac{10^3}{2400} \text{ ms} \approx 0,417 \text{ ms}$$

Die Tabelle 5.3 veranschaulicht die verschiedenen Schrittgeschwindigkeitsstufen und ihre Anwendung bei der digitalen Nachrichtenübertragung im Fernmeldenetz der DBP.

Tabelle 5.3: Schrittgeschwindigkeiten im Fernmeldenetz der DBP

v_s	Anwendung
50 Baud	Telexnetz, Gentexnetz, Telegrafensondernetze
100 Baud	Telegrafensondernetze
200 Baud	Datexnetz; Datenübertragung im Fernsprechnetz
1200 Baud	Datenübertragung im Fernsprechnetz
2400 Baud	Datenübertragung im Fernsprechnetz und über Fernsprechsonderleitungen
9600 Baud	Datenübertragung über Breitbandleitungen

In der Datenübertragungstechnik ist häufig auch die Maßeinheit **bit/s**¹ gebräuchlich. Dabei wird die Zahl der Bit angegeben, die pro Sekunde übertragen werden kann. Wir erinnern uns, daß ein Binärschritt den Informationsinhalt 1 Bit hat. Wenn z. B. 200 Binärschritte pro Sekunde übertragen werden, dann entspricht das einer Schrittgeschwindigkeit von 200 Baud. Damit werden aber auch gleichzeitig 200 Bit in der Sekunde übertragen, die Übertragungsgeschwindigkeit ist also 200 bit/s.

¹ Bit wird als Hauptwort groß geschrieben, in der Maßeinheit jedoch klein.

5.3. Bildung von Telegrafierzeichen

5.3.1. Telegrafenalphabet

Wir wollen uns nun damit beschäftigen, auf welche Art und Weise mit Hilfe von Binärschritten Nachrichten übertragen werden können. Es ist leicht einzusehen, daß ein einzelner, für sich allein stehender Binärschritt nicht ausreicht, um die Fülle der Schriftsymbole darzustellen. Ein einzelner Binärschritt könnte ja dem Empfänger lediglich 2 verschiedene Nachrichten signalisieren, z. B. „ja“ oder „nein“. Wir müssen folglich mehrere Binärschritte zu einem Block zusammenfügen und diesem Block eine der Nachrichten, die übermittelt werden sollen (Buchstaben, Ziffern usw.), als Bedeutung geben. Solch ein aus einer bestimmten Anzahl von Binärschritten bestehender Block heißt **Telegrafierzeichen**, oft auch kurz **Zeichen** genannt.

Zwischen dem Sender und dem Empfänger einer Telegrafenerbindung muß Klarheit darüber bestehen, welches Nachrichtensymbol mit einem bestimmten Telegrafierzeichen gemeint ist. Daher muß eine Verabredung über die Zuordnung der Nachrichten zu den Telegrafierzeichen getroffen sein. Solch eine Verabredung heißt allgemein **Code** (lateinisch codex = Verzeichnis) und speziell in der Telegrafener- und Datentechnik **Telegrafenalphabet**. Ein Telegrafenalphabet gibt also Auskunft darüber, welches Telegrafierzeichen einem bestimmten Nachrichtensymbol entspricht.

Das weitaus am häufigsten verwandte Telegrafenalphabet ist das Internationale Telegrafenalphabet Nr. 2. Bei ihm bestehen alle Telegrafierzeichen aus je fünf Binärschritten. Abb. 5.2 zeigt die Tabelle dieses Alphabets.

Kombinations-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Buchstaben	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	<	=	A	I	Z	
Ziffern/Zeichen	-	?	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	/	.	:	;	'	!	~	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^
Binärschritte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

● Binärschritt mit Kennzustand Z (Stoppolarität) ≡ Zeilenvorschub
 □ Binärschritt mit Kennzustand A (Startpolarität) A Umschaltung auf Buchstabenabdruck
 KG Kennungsgeberauslösung 1 Umschaltung auf Ziffern-/Zeichenabdruck
 KI Klingelzeichen Zw Zwischenraum
 < Wagenrücklauf

Abb. 5.2 — Internationales Telegrafenalphabet Nr. 2

Im Telexnetz und im Gentexnetz arbeiten alle Fernschreibgeräte auf der Grundlage des Internationalen Telegrafenalphabets Nr. 2. Im

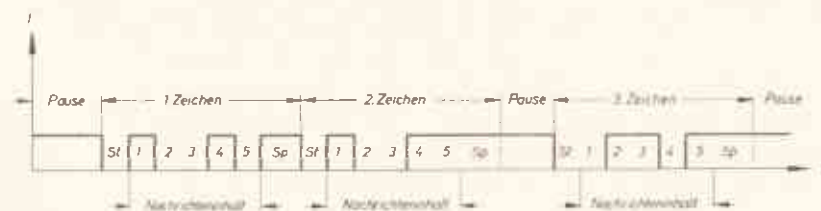
internationalen Fernschreibverkehr ist es die Voraussetzung für den weltweiten Nachrichtenaustausch. Daneben gibt es aber auch noch andere Telegrafenalphabete mit mehr als fünf Schritten pro Zeichen, die hauptsächlich bei der Datenübertragung verwendet werden. Natürlich können nur zwischen solchen Geräten Nachrichten ausgetauscht werden, die mit dem gleichen Telegrafenalphabet arbeiten.

5.3.2. Start-Stop-Zeichen

Jede Nachricht, die auf telegrafischem Wege übermittelt wird, besteht aus mehr oder weniger vielen Telegrafierzeichen. Jedes dieser Telegrafierzeichen setzt sich wieder aus einer Reihe von Binärschritten zusammen, und zwar meistens aus fünf. Wir wollen jetzt untersuchen, auf welche Art und Weise man Telegrafierzeichen bei der Übermittlung aneinanderreihen kann.

Gehen wir zunächst einmal von einer Übermittlungspause aus. Während dieser Zeit muß einer der beiden Binärzustände auf der Leitung sein, entweder Strom (Z) oder kein Strom (A). Aus praktischen Gründen hat man den Kennzustand für die Übermittlungspause mit Strom (Z) gewählt, denn dann lassen sich leicht Adernbrüche von Pausen unterscheiden. Bevor nach der Pause ein neues Telegrafierzeichen übermittelt werden kann, muß dem Empfänger zunächst das Ende der Pause durch ein besonderes Signal angezeigt werden. Dieses Signal kann nur ein Binärschritt mit einem entgegengesetzten Kennzustand zur Pausenpolarität sein. Es muß also ein Kein-Strom-Schritt sein. Wegen seiner Funktion heißt er **Startschritt St** (er startet den Empfänger).

Nach dem Startschritt können die Binärschritte übermittelt werden, die den eigentlichen Nachrichteninhalt tragen. Diese werden vom Empfänger in der Reihenfolge ihres Eintreffens abgetastet und zunächst zwischengespeichert. Sind alle Nachrichtenschritte eingetroffen, kann der Empfänger wieder seine Ruhelage einnehmen. Das geschieht während des Empfangs eines zusätzlichen Schrittes, der wegen seiner



St = Startschritt
Sp = Stopschritt
1...5 = binäre Nachrichtenschritte

Abb. 5.3 — Start-Stop-Zeichenfolge

Funktion **Stopschritt Sp** heißt (er stoppt den Empfänger). Der Stopschritt ist ein Strom-Schritt mit der Mindestlänge $1,5 T_s$. Gleichzeitig leitet der Stopschritt eine eventuell folgende Übermittlungspause ein. **Telegrafierzeichen, die durch einen Startschritt eingeleitet und durch einen Stopschritt abgeschlossen sind, heißen Start-Stop-Zeichen.** Abb. 5.5 zeigt eine Folge von 3 Start-Stop-Zeichen, die nach dem Internationalen Telegrafenalphabet Nr. 2 gebildet wurden.

5.3.3. Maße für die Übertragung von Telegrafierzeichen

Unter **Zeichengeschwindigkeit v_z** versteht man die Zahl von Telegrafierzeichen, die maximal pro Minute gesendet bzw. empfangen werden kann. Die Maßeinheit ist **Zeichen/Minute**. Um die Zeichengeschwindigkeit rechnerisch erfassen zu können, muß zunächst die zeitliche Länge T_z eines Zeichens bekannt sein. Diese ergibt sich aus der Anzahl A der Schritte eines Telegrafierzeichens (einschl. Start- und Stopschritt) multipliziert mit der Schrittdauer T_s , also $T_z = A \cdot T_s$. Damit läßt sich die Zeichengeschwindigkeit als Kehrwert der Zeichenlänge errechnen:

$$v_z = \frac{60}{A \cdot T_s} \frac{\text{Zeichen}}{\text{Minute}}$$

Der Faktor 60 muß deshalb eingesetzt werden, weil die Schrittdauer T_s in Sekunden angegeben wird, das Ergebnis aber in Zeichen/Minute erwartet wird.

Beispiel:

Ein Fernschreibapparat erzeugt Start-Stop-Zeichen nach dem Internationalen Telegrafenalphabet Nr. 2 mit einer Schrittgeschwindigkeit von 50 Bd. Wie groß ist die Zeichengeschwindigkeit?

Lösung:

Ein Zeichen besteht aus 1 Startschritt, 5 Nachrichtenschritten und 1,5 Stopschritten, also ist $A = 7,5$.

Die Schrittdauer bei 50 Bd ist $T_s = \frac{1}{50} = 0,02$ s.

$$v_z = \frac{60}{7,5 \cdot 0,02} = 400 \text{ Zeichen/Minute}$$

Nicht zu verwechseln mit der Zeichengeschwindigkeit ist die Arbeitsgeschwindigkeit der Bedienungsperson eines Fernschreibapparats. Die Zeichengeschwindigkeit ist ein festgelegter Wert, der sich aus den technischen Gegebenheiten (Telegrafenalphabet, Schrittgeschwindigkeit) eines Fernschreibapparats ergibt. Dagegen hängt die Arbeitsgeschwindigkeit von der Fingerfertigkeit der Bedienungsperson ab und hat im allgemeinen kleinere Werte als die Zeichengeschwindigkeit.

5.4. Übertragung von Telegrafennachrichten und Daten

5.4.1. Übertragungsverfahren für Binärschritte

Bei allen bisherigen Betrachtungen hatten wir stets die Einfachstromtastung zugrunde gelegt. Die Binärschritte werden dabei durch die Kennzustände Strom oder kein Strom gebildet. Diese Schritte lassen sich allerdings nur auf Leitungen übertragen, die gleichstromdurchlässig sind. Verstärker oder Fernleitungsübertrager in den Leitungen würden die Übertragung solcher Gleichstromschritte unterbinden. Die Einfachstromtastung läßt sich daher nur im Nahbereich verwenden, z. B. auf den Anschlußleitungen der Telegrafennetze.

Die Verbindungsleitungen zwischen den Telegrafenvermittlungsstellen müssen gewöhnlich über größere Entfernungen geführt werden. Im Weitverkehr stehen aber im allgemeinen keine gleichstromdurchlässigen Übertragungswege zur Verfügung. Verstärkte NF-Leitungen können nur Wechselstromnachrichten übertragen, und TF-Kanäle haben einen Frequenzbereich, der von 300 Hz bis 3400 Hz reicht. Wenn also verstärkte NF-Leitungen oder TF-Kanäle zur Übertragung von Telegrafennachrichten benutzt werden sollen, so ist es erforderlich, daß zunächst die Gleichstromschritte in Wechselstromschritte umgewandelt werden.

Mit Hilfe von Wechselstrom lassen sich Binärschritte auf zwei verschiedene Arten bilden:

- durch Ein- und Ausschalten des Wechselstroms oder
- durch Umtasten zweier benachbarter Frequenzen.

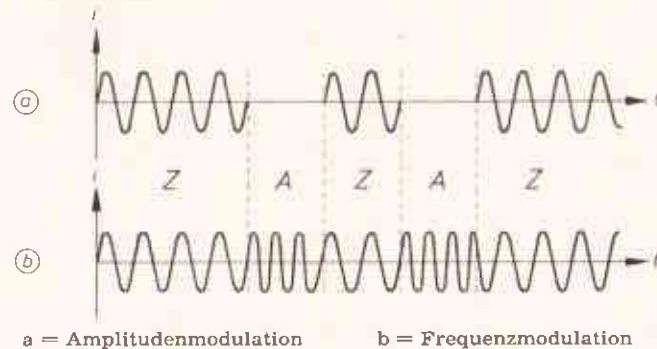


Abb. 5.4 — Wechselstromtastarten

Bei der unter a in Abb. 5.4 dargestellten Tastart werden die Binärzustände durch Wechselstrom oder kein Wechselstrom dargestellt. Man kann auch sagen durch Ton oder kein Ton, weil als Träger für die Binärschritte Frequenzen im Tonbereich verwandt werden. Da

der Nachrichteninhalt in der Amplitude eines als Träger benutzten Wechselstroms liegt (die Amplitude ist entweder zu 100% oder gar nicht da), heißt diese Tastart **Amplitudenmodulation AM**.

Die Tastart, die in Abb. 5.4 unter b dargestellt ist, arbeitet mittels Umtastung zweier Frequenzen. Der Nachrichteninhalt liegt bei dieser Tastart in der Frequenz; man bezeichnet sie daher als **Frequenzmodulation FM**.

5.4.2. Wechselstromtelegrafie (WT)

Telegrafen- und Datennachrichten werden meistens über Weitverbindungen übermittelt. Im Weitverkehr stehen aber im allgemeinen keine gleichstromdurchlässigen Übertragungswege zur Verfügung. TF-Kanäle übertragen ja bekanntlich nur Frequenzen im Bereich zwischen 300 und 3400 Hz. Sollen TF-Kanäle für die Übertragung von Binärschritten benutzt werden, so müssen die Binärschritte zuvor in eine der beiden Wechselstromtastarten umgewandelt werden. Die Wechselstromschritte werden dann vom TF-Kanal einwandfrei übertragen.

Die Umwandlung der Gleichstromschritte in Wechselstromschritte bringt einen zusätzlichen Vorteil mit sich. Da der Frequenzbedarf für die Übertragung von Binärschritten viel geringer ist als für die Übertragung eines Ferngesprächs, lassen sich TF-Kanäle mehrfach ausnutzen, indem man mehreren Binärnachrichten verschiedene Tast-

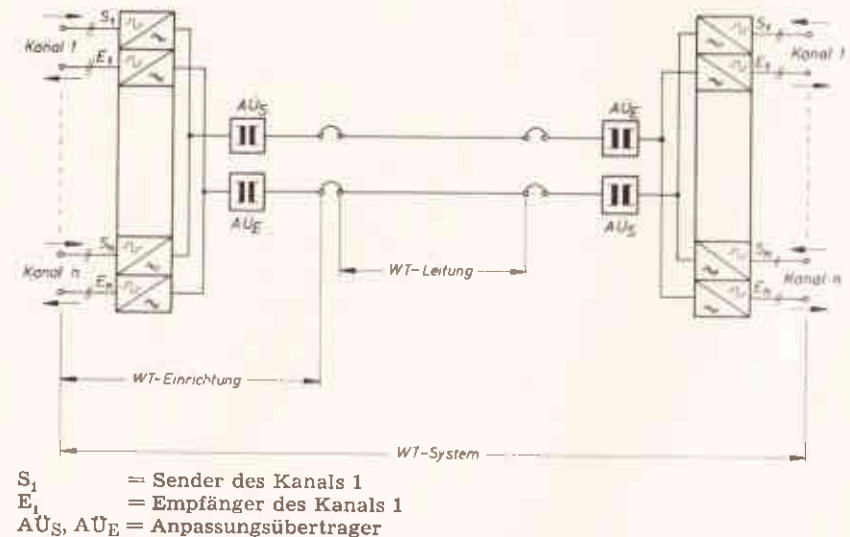


Abb. 5.5 — Blockschaltbild eines WT-Systems mit n WT-Kanälen

frequenzen gibt. Diese können alle gemeinsam über einen TF-Kanal übertragen werden. Die so gebildeten Telegrafie-Kanäle heißen **Wechselstromtelegrafie-Kanäle (WT-Kanäle)**. Die Einrichtungen, in denen die Umsetzung von der Gleichstromtastung in die Wechselstromtastung und umgekehrt erfolgt, heißen **Wechselstromtelegrafie-Einrichtungen (WT-Einrichtungen)**. Die WT-Einrichtungen sind durch **WT-Leitungen** miteinander verbunden; hierbei handelt es sich meist um TF-Kanäle, manchmal auch um verstärkte oder unverstärkte NF-Stromkreise. WT-Einrichtungen und WT-Leitung bilden zusammen ein **WT-System**. Abb. 5.5 zeigt schematisch die Struktur eines WT-Systems.

Die Bandbreite eines WT-Kanals ist abhängig von der Schrittgeschwindigkeit der Binärschritte, für die der Kanal bestimmt ist. Bei $v_s = 50$ Baud beträgt die Bandbreite 120 Hz, bei 100 Baud 240 Hz und bei 200 Baud beträgt sie 480 Hz. Dementsprechend lassen sich 24 WT-Kanäle für eine Nennschrittgeschwindigkeit von 50 Baud, 12 WT-Kanäle für 100 Baud oder 6 WT-Kanäle für 200 Baud in einem WT-System bilden.

WT-Kanäle werden als Verbindungsleitungen in den Telegrafennetzen (Telex-, Gentex- und Datexnetz) sowie zur Schaltung von Telegrafensonderleitungen eingesetzt.

5.4.3. Modems

Im Rahmen ihrer Datendienste bietet die DBP unter anderem auch die Datenübertragung über das Fernsprechnetz oder über überlassene Fernsprechstromwege an (vgl. Tabelle 5.1). Die dabei benutzten Übertragungswege sind zur Übertragung von Sprechwechselströmen geschaffen. Eine Übertragung von Gleichstrom über eine Fernsprechverbindung ist wegen der im I. GW in den Sprechadern eingeschleiften Ortsleitungs-Übertrager nicht möglich. Da alle Datenendgeräte ihre Nachrichten durch Gleichstromtastung erzeugen, müssen bereits beim Datensender die Gleichstromschritte in Wechselstromschritte umgewandelt werden, und beim Datenempfänger muß die entsprechende Rückumsetzung erfolgen. Das Gerät, das diese Funktion ausfüllt, heißt **Modem (Modulator-Demodulator)**. Die Aufgabe eines Modems hat also gewisse Ähnlichkeit mit der Aufgabe einer WT-Einrichtung, nur daß beim Modem keine Mehrfachausnutzung des Übertragungsweges erfolgt. In der Abb. 5.6 ist das Prinzip der Anschaltung einer Datenendeinrichtung über einen Modem an einen Fernsprechanschluß dargestellt.

Modems sind posteigene Zusatzeinrichtungen zu Fernsprechanschlüssen. Für sich allein können Modems nicht arbeiten. An jeden Modem muß vielmehr eine **Datenendeinrichtung** angeschlossen werden. Diese

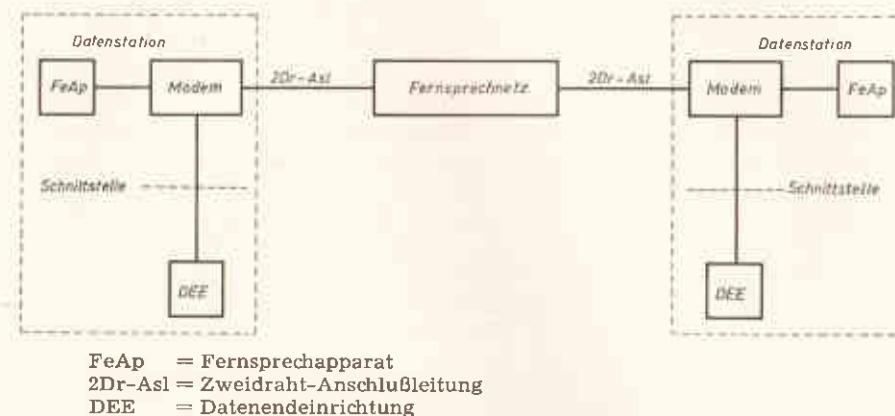


Abb. 5.6 — Prinzip der Datenübertragung im Fernsprechnetz

muß in der Lage sein, binäre Daten zu erzeugen (Senderichtung) oder zu empfangen und aufzuzeichnen (Empfangsrichtung). Heute gibt es eine Vielzahl von Geräten, die als Datenendeinrichtungen eingesetzt werden können. Sie reichen von einfachen Lochstreifenlesern über Lochkartengeräte, Magnetbandgeräte bis hin zu Datensichtgeräten (Bildschirmgeräten). Ständig werden neue und modernere Geräte von der Industrie entwickelt und angeboten. Alle Datenendeinrichtungen, die an Modems angeschlossen werden, sind private Einrichtungen der Teilnehmer. Sie müssen jedoch den technischen Bedingungen der DBP entsprechen. Dazu ist es erforderlich, daß sie vom Fernmeldetechnischen Zentralamt (FTZ) zum Anschluß an Fernmeldeleitungen zugelassen werden.

Von einer Datenstation des Fernsprechnetzes, wie sie in Abb. 5.6 prinzipiell dargestellt ist, lassen sich entweder Ferngespräche führen oder Daten senden bzw. empfangen. In der Ruhelage der Station ist der Fernsprechapparat über den Modem mit der Anschlußleitung verbunden. Auf- und Abbau einer Fernsprechverbindung geschieht mit Hilfe des Fernsprechapparates. Erst wenn Datenübertragung erfolgen soll, wird der Fernsprechapparat abgeschaltet und die Datenendeinrichtung an den Modem und damit an die Fernsprechverbindung angeschlossen. Diese Umschaltung kann z. B. durch Drücken auf eine besondere Datentaste erfolgen, die im Fernsprechapparat eingebaut ist.

6. PCM-Technik

Alle gegenwärtig gebräuchlichen Übertragungsverfahren für Fernsprechnachrichten arbeiten nach dem Prinzip der analogen Übertragung. Dabei wird der Schall im Sender in elektrische Wellen umgewandelt, die sowohl in der Frequenz als auch in der Amplitude genau mit den Schallwellen übereinstimmen. Im Empfänger erfolgt die entsprechende Rückumsetzung. Wir haben in den vorhergehenden Abschnitten die wichtigsten Möglichkeiten der analogen¹ Sprachübertragung auf Fernmeldewegen behandelt.

Einen völlig anderen Weg bei der Übertragung von Fernsprechnachrichten beschreitet man mit der **PCM-Technik** (PCM = **P**uls-**C**ode-**M**odulation). Dabei wird die Sprache nicht mehr analog mit Hilfe von elektrischen Wellen übertragen. Die Sprachschwingungen werden vielmehr am Eingang einer PCM-Übertragungsstrecke in **digitale¹ Signale** umgewandelt. Natürlich muß am Ausgang der PCM-Übertragungsstrecke die Rückumwandlung der Digitalsignale in die ursprünglichen Schwingungen erfolgen. Auf dem Übertragungsweg haben die Nachrichten eine Form, die eher an Fernschreib- oder Datensignale erinnert als an ein Ferngespräch.

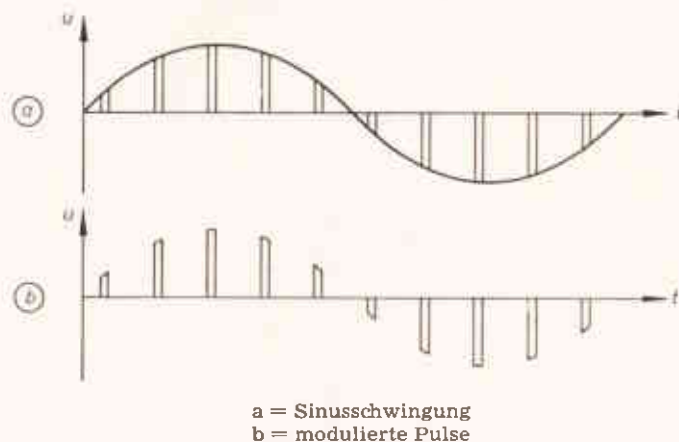


Abb. 6.1 — Darstellung einer Sinusschwingung durch Pulse

Wir wissen, daß die menschliche Sprache ein Gemisch von sinusförmigen Schwingungen ist. Bei der Fernsprechübertragung geht es also darum, sinusförmige Schwingungen möglichst wenig verfälscht über Fernmeldewege zu transportieren. In Abb. 6.1a ist eine solche

¹ Die Begriffe analog und digital sind im Abschnitt 5.1 näher erläutert.

sinusförmige Schwingung dargestellt. Nun ist es nicht erforderlich, die ganze Schwingung elektrisch zu übertragen. Es genügt vielmehr, wenn in regelmäßigen Abständen kurze Impulse folgen, deren Amplituden mit dem jeweiligen Augenblickswert der Sinusschwingung übereinstimmen (Entnahme einer Amplitudenprobe). Solche regelmäßig wiederkehrenden Impulse tragen die spezielle Bezeichnung **Pulse** (Einzahl: der Puls). In Abb. 6.1 a sind beispielsweise 10 Pulse eingezeichnet. Darunter sind in der Abb. 6.1 b die 10 Pulse nochmals dargestellt, jetzt aber losgelöst von der ursprünglichen Sinusschwingung. Es ist daran wohl anschaulich zu erkennen, daß eine geeignete Demodulationsschaltung aus den Pulsen wieder die Sinusschwingung zurückformen kann.

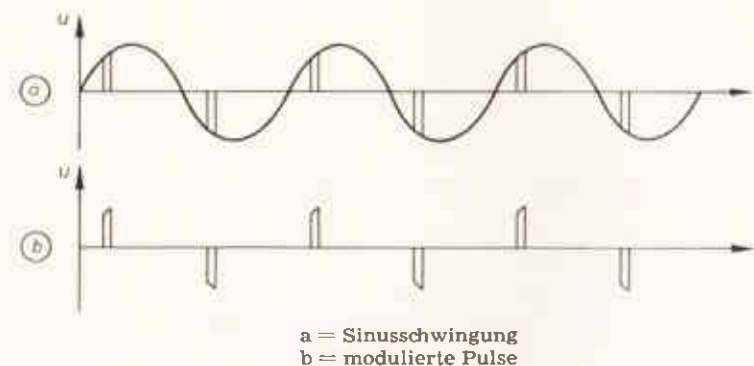


Abb. 6.2 — Mindest erforderliche Pulszahl

Es stellt sich nun die Frage, wieviel solcher Pulse erforderlich sind, um daraus eine Sinusschwingung wieder einwandfrei zurückgewinnen zu können. Mathematische Überlegungen und praktische Versuche haben ergeben, daß dazu nur **2 Pulse je Sinusschwingung** erforderlich sind. In Abb. 6.2 ist dieser Zusammenhang für 3 Sinusschwingungen dargestellt. Allerdings ist der Pulsfolge (Abb. 6.2b) nun nicht mehr anzusehen, daß sich darin Sinusschwingungen verbergen. Wir wollen uns hier mit der durch praktische Versuche erwiesenen Tatsache begnügen, daß solch eine Pulsfolge nach Durchlaufen einer Demodulationsschaltung wieder in die unverfälschten Sinusschwingungen zurückgewandelt wird.

Für die Bestimmung des zeitlichen Abstandes der einzelnen Pulse untereinander müssen wir uns an der höchsten Frequenz orientieren, die übertragen werden soll. Wie bei TF-Kanälen wird auch bei der PCM-Technik das Sprachband auf 3400 Hz begrenzt. Es müssen also noch sinusförmige Signale mit 3400 Schwingungen pro Sekunde übertragen werden. Da für jede einzelne Schwingung mindestens 2 Pulse

erforderlich sind, müssen aus dem Frequenzgemisch der Sprache folglich $2 \cdot 3400 = 6800$ Pulse pro Sekunde geformt werden. Um die Übertragung noch sicherer zu machen, arbeitet man mit 8000 Pulsen pro Sekunde; man spricht von einer **Pulsfrequenz von 8000 Hz**. Die einzelnen Pulse haben damit einen zeitlichen Abstand von $\frac{1}{8000} \text{ s} = 125 \text{ } \mu\text{s}$. Bei dieser Pulsfolge werden nur die höchsten im Sprachband vorkommenden Frequenzen durch 2 Pulse pro Schwingung dargestellt. Die wesentlich häufiger vorkommenden tieferen Frequenzen werden natürlich bei der gegebenen Pulsfrequenz durch mehrere Pulse dargestellt, beispielsweise eine Schwingung von 800 Hz durch 10 Pulse.

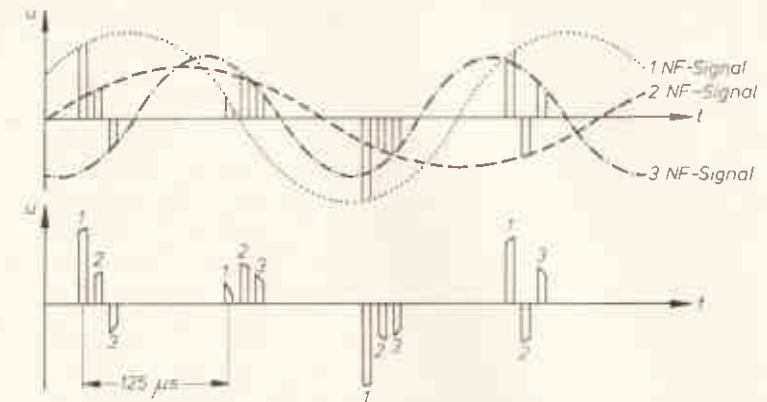


Abb. 6.3 — Prinzip eines Multiplexers für 5 NF-Kanäle

Abb. 6.2b läßt den Vorteil der pulsweisen Nachrichtenübertragung erkennen. Wenn die einzelnen Pulse nämlich genügend schmal gemacht werden, dann bleibt sehr viel Platz (= freie Zeit) zwischen 2 Pulsen. Wir haben oben festgestellt, daß bei einem Ferngespräch alle $125 \text{ } \mu\text{s}$ ein Puls gebildet werden muß. Angenommen, jeder Puls hätte eine Dauer von $1 \text{ } \mu\text{s}$, dann blieben $124 \text{ } \mu\text{s}$ freie Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen. Dieser Platz läßt sich zur Übertragung anderer Sprachnachrichten über die gleiche Leitung ausnutzen. Die Nachrichten werden also zeitlich ineinander verschachtelt. Dazu ist es erforderlich, daß an den beiden Endstellen des PCM-Übertragungssystems Abtasteinrichtungen, **Multiplexer** (= Vielfacher) genannt, vorhanden sind. Diese haben die Aufgabe, die NF-Leitungen jeweils für die Dauer eines Pulses an das Übertragungssystem anzuschließen. In Abb. 6.3 ist das Prinzip solcher Multiplexer angedeutet, hier für die zeitliche Verschachtelung von fünf Sprachnachrichten. In der Praxis erfolgt die Verteilung im Multiplexer natürlich nicht etwa mit umlaufenden Schaltarmen, sondern mit trägheitslosen elektronischen Schaltelementen. Der Gleichlauf der Multiplexer an beiden Endstellen muß selbstverständlich extrem genau sein, damit jede NF-Leitung auch die für sie bestimmten Pulse erhält.

Wir haben jetzt kennengelernt, daß ein Übertragungsweg dadurch mehrfach ausgenutzt werden kann, daß mehrere Nachrichten zeitlich ineinander verschachtelt übertragen werden. Dieses Verfahren trägt daher die allgemeine Bezeichnung **Zeitmultiplex-Übertragung**. Im

Gegensatz dazu erfolgt in der TF-Technik die Mehrfachausnutzung der Übertragungswege durch Frequenzmultiplex-Übertragung.



1, 2, 3 = zu den jeweiligen NF-Signalen gehörende Pulse

Abb. 6.4 — Zeitliche Verschachtelung der Pulse mehrerer Sinusschwingungen

Abb. 6.4 zeigt als Beispiel eine Pulsfolge, in der 3 verschiedene Fernsprechnachrichten zeitlich ineinander verschachtelt enthalten sind. Gegenwärtig baut man PCM-Übertragungssysteme mit 32 Kanälen (30 Kanäle für Sprache und 2 Kanäle für Wählzeichen usw.) Das bedeutet, daß nacheinander die Pulse von 32 verschiedenen Nachrichten über den gemeinsamen PCM-Übertragungsweg übertragen werden. Da die Pulse, die zu einer Sprachnachricht gehören, im Abstand von $125 \text{ } \mu\text{s}$ aufeinanderfolgen müssen, sind also während $125 \text{ } \mu\text{s}$ nacheinander 32 NF-Signale abzutasten. Eine einzelne Abtastung darf also nur weniger als $4 \text{ } \mu\text{s}$ dauern. Wir erkennen an diesen Zeitbedingungen, wie extrem genau die Multiplexer arbeiten müssen.

Wir sind bisher davon ausgegangen, daß die zu übertragende Nachricht in der Amplitude der Pulse enthalten ist. Praktische Versuche haben jedoch gezeigt, daß die Pulsamplitude nicht hundertprozentig mit dem Augenblickswert der Sinusschwingung übereinstimmen muß. Kleine Amplitudenabweichungen spielen kaum eine Rolle, sie vermindern die Übertragungsqualität nicht. Aus diesem Grunde können für die Pulsamplituden bestimmte Werte vorgegeben werden (Amplitudenstufen). Das Beispiel in Abb. 6.5 soll zur Verdeutlichung dienen. Es ist eine Sinusschwingung von 2000 Hz gegeben, die durch 4 Pulse im Abstand von jeweils $125 \text{ } \mu\text{s}$ abgetastet wird. Auf der senkrechten Achse des Diagramms sind 8 Intervalle eingezeichnet. Bei der Bildung der Pulse wird verglichen, in welches Intervall der betreffende Puls fällt. In dem gezeichneten Beispiel fällt der 1. Puls ins 6. Intervall, der 2. Puls ins 8. Intervall, der 3. Puls ins 3. Intervall und der 4. Puls ins

1. Intervall. Nun genügt es, dem Empfänger mitzuteilen, in welches Intervall der jeweilige Puls fällt. Der Empfänger kann dann einen Puls nachbilden, der dem ursprünglichen Puls auf der Sendeseite nahezu entspricht.

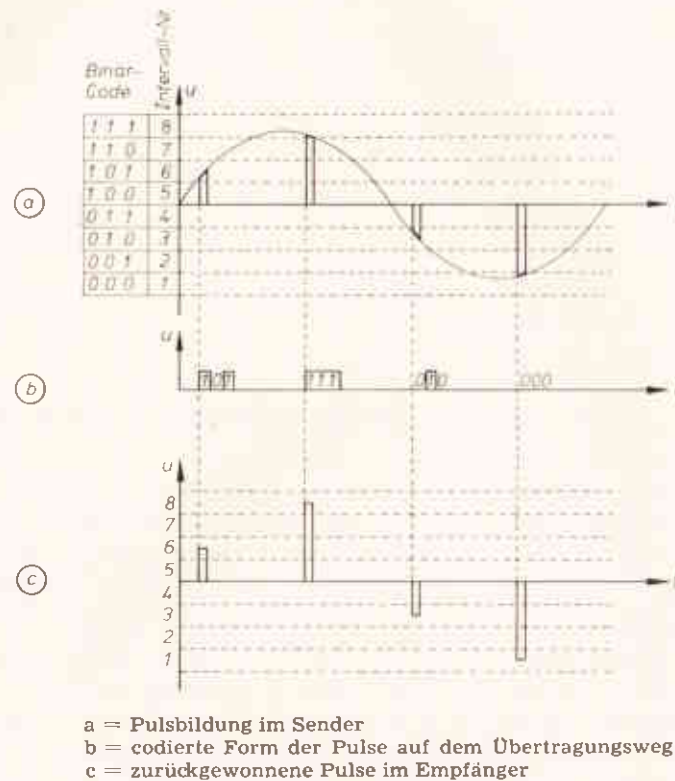


Abb. 6.5 — Codierte Pulsübertragung

Die Übermittlung der Nummer des Intervalls, in das ein Puls fällt, erfolgt **codiert mittels Binärschritten**. Um beispielsweise die 8 vorgegebenen Intervalle in Abb. 6.5 eindeutig zu bezeichnen, sind 3 Binärschritte erforderlich. Jeder einzelne Binärschritt kann dabei die Zustände **1 (Strom)** und **0 (kein Strom)** annehmen. In Abb. 6.5a ist auf der senkrechten Achse neben der Nummer der Intervalle auch der zugehörige Binär-Code angegeben. Ein dem Multiplexer nachgeschaltetes Bauteil, der **Codierer**, sorgt für die Umwandlung der Pulse in Binärschritte. Auf dem Übertragungsweg werden somit anstelle jedes Pulses 3 Binärschritte übertragen; Abb. 6.5b deutet die Binärschrittübertragung an. Am anderen Ende des Übertragungs-

weges müssen natürlich mittels eines **Decodierers** die Binärschritte wieder in Pulse zurückverwandelt werden. Abb. 6.5c zeigt solche zurückgewonnenen Pulse. Sie weichen in ihrer Amplitude etwas von den ursprünglichen Pulsen ab.

Die Qualität der am Ausgang des PCM-Übertragungsweges abgegebenen Sprachsignale ist um so besser, je genauer die Pulse nach der Rückwandlung aus Binärschritten nachgebildet werden. Die Genauigkeit steigt mit zunehmender Feinheit der Intervalle beim Sender: Je größer die Zahl der Intervalle, je kleiner also ein Einzelintervall ist, desto geringer ist der Nachbildfehler bei der Rückgewinnung der Pulse. An sich wäre bei 8 Intervallen, die in Abb. 6.5 zugrunde gelegt wurden, schon Sprechverständnis möglich. Um die Qualität aber zu steigern, arbeitet man bei der PCM-Technik mit 256 Intervallen. Es wird also der Empfangsschaltung bei jedem Puls mitgeteilt, in welches der 256 Intervalle er fällt. Damit ist der Nachbildfehler bei der Pulsrückgewinnung so klein, daß eine Qualitätsbeeinträchtigung des Ferngesprächs nicht mehr wahrnehmbar ist.

Um 256 verschiedene Intervalle anzeigen zu können, sind 8 Binärschritte erforderlich. Es muß also jeder Puls im Codierer des PCM-Senders in eine Kombination von 8 Binärschritten umgewandelt werden. Im Decodierer des PCM-Empfängers muß dann aus jeweils 8 Binärschritten ein Puls zurückgewonnen werden.

Wir erinnern uns, daß jedes einzelne Ferngespräch mit einer Pulsfrequenz von 8000 Hz abgetastet wird. Weiter erinnern wir uns, daß im Multiplexer die Pulse von 32 Kanälen zeitlich ineinander verschachtelt werden. Am Ausgang des Multiplexers werden damit $32 \cdot 8000 = 256000$ Pulse pro Sekunde abgegeben. Die Amplitude jedes einzelnen dieser Pulse muß im Codierer durch 8 Binärschritte (= 8 Bit) dargestellt werden. Am Ausgang des Codierers werden also $8 \cdot 256000 = 2048000$ Binärschritte pro Sekunde abgegeben. Diese werden noch geringfügig umgeformt und dann über eine Doppelader übertragen. Wir erkennen aus den genannten Zahlen, daß jeder einzelne Binärschritt weniger als eine halbe Mikrosekunde lang ist. Die Geräte müssen folglich äußerst präzise arbeiten, anders wäre eine solche Übertragung unmöglich. Es versteht sich, daß eine derartige Genauigkeit nur durch elektronische Bauteile erzielbar ist.

Als Übertragungswege für PCM-Signale eignen sich papierisolierte Kabeladern, die nicht bespult sein dürfen. Für die Übertragung von 2048000 bit/s ist ein sehr breites Frequenzband erforderlich. Bei sehr hohen Frequenzen haben Kabeladern aber auch eine große Dämpfung. Deshalb müssen in kurzen Abständen (etwa alle 2 bis 3 km) Verstärker in die Leitung eingeschleift werden. Die Verstärker empfangen die gedämpft ankommenden Binärschritte, erneuern sie und geben sie mit angehobenem Pegel auf den nächsten Leitungsabschnitt.

Dabei kann ein Verstärker zwischen den Binärschritten, die Träger der Nachricht sind, und Störungen (Geräusche, Oberwellen, Nebensprechen) unterscheiden. Er ist damit in der Lage, alle Störungen zu unterdrücken und nur die reinen Nachrichten weiterzuleiten. Das können aber die Verstärker in der NF- und in der TF-Technik nicht, denn sie verstärken die analogen Sprachnachrichten und alle Störungen gemeinsam. Aus diesem Grunde ist die Qualität der PCM-Übertragung besser als die der Analog-Übertragung.

Abb. 6.6 zeigt das Blockschaltbild einer PCM-Verbindung. Dabei ist allerdings nur eine Übertragungsrichtung gezeichnet. Symmetrisch muß man sich dazu die Rückrichtung denken. Die Art der technischen Einrichtungen (Verstärker, Codierer usw.) erfordert nämlich eine Vierdrahtleitung.

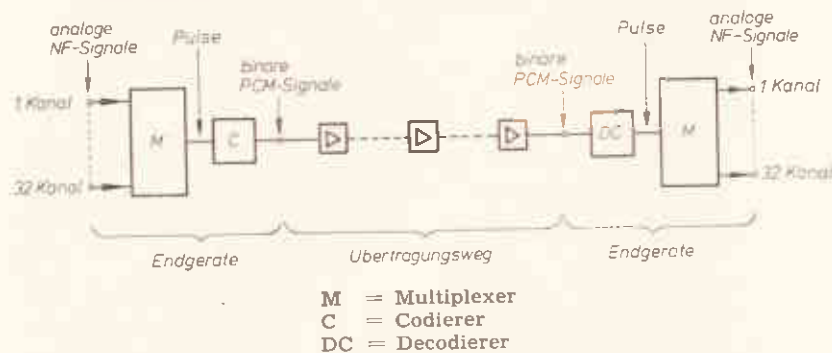


Abb. 6.6 — Blockschaltbild einer PCM-Verbindung

Gegenwärtig sind PCM-Systeme noch im Versuchsbetrieb. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß schon in naher Zukunft die Serienfertigung der Geräte aufgenommen werden kann. Vor allem im Nahbereich wird die PCM-Technik ihre Einsatzgebiete finden. Wirtschaftlichkeitsrechnungen haben ergeben, daß auf Entfernungen zwischen 10 und 40 km PCM-Kanäle die kostengünstigsten Übertragungswege sind. Bei kleineren Entfernungen sind einfach genutzte Kabeldoppeladern wirtschaftlicher. Auf Entfernungen über 40 km werden dagegen im allgemeinen TF-Kanäle die geringsten Kosten verursachen. Die PCM-Technik wird deshalb vor allem in den großen Fernsprechnetzen sowie in den Bezirksnetzen eingesetzt werden, z. B. zur Schaltung von Verbindungsleitungen zwischen den Vermittlungsstellen.

Der Vorteil der PCM-Übertragung gegenüber der einfachen Nutzung von Kabeladern liegt zum einen in der bereits geschilderten Mehrfachausnutzung der Stromwege. Bei den gegenwärtig gebauten PCM-Übertragungssystemen werden 30 Sprachkanäle (+ 2 Signalisierungs-

kanäle) über 2 Doppeladern übertragen. Eine Doppelader wird folglich 15fach ausgenutzt. Die Einsparung von Kabeladern im Entfernungsbereich zwischen 10 und 40 km macht den zusätzlichen Mehraufwand an technischen Endgeräten und Verstärkern mehr als wett. Zum anderen liegt der Vorteil der PCM-Übertragung in der Unempfindlichkeit der Nachrichten gegen Störungen. Die binären Code-signale auf dem Übertragungsweg können leicht von Störungen wie Geräuschen, unerwünschten Oberwellen, Nebensprechen usw. befreit und wieder regeneriert werden. PCM-Übertragung ist daher auch auf solchen Leitungen noch einwandfrei möglich, auf denen eine normale Analogübertragung schon sehr stark gestört würde, wenn nicht gar unmöglich wäre.

Band 5

– Werkstoffbearbeitung

Werk- und Hilfsstoffe – Werkstoffbearbeitung – Technisches Zeichnen
– Arbeitsschutz und Unfallverhütung – Umgang mit Tabellenbüchern

● **Repetitor zum Band 5**

Band 6

– Fernsprechapparate – Fernsprechentstörung – Nebenstellenanlagen (mit Beiheft)

Fernsprechapparate – Zusatzeinrichtungen – Fernsprechentstörung – Aufbau und Bedienung des HVt und des Schaltfeldes – Wählnebenstellenanlagen und Reihenanlagen

● **Repetitor zum Band 6**

Band 7

– Linientechnik (2 Teile)

Zweck und Aufbau der Bauteile im Ortsanschlußnetz – Kabelkanalanlage – Fernmeldekabel – Einziehen von Röhrenkabeln – Auslegen von Erdkabeln – Kabelmontagearbeiten – Druckluftüberwachung von Ortskabeln – Schutz gegen Korrosion – Linienunterlagen für Ortsnetze – Auskundung – Bau oberirdischer Ortsanschlußlinien – Bau oberirdischer Kabelanlagen – Unterhaltungsarbeiten an Holzmastlinien – Sprechstellenbau – Teilnehmerleinrichtungen – Sprechstellenbauauftrag – Erdungsanlagen – Schutz gegen Überspannungen und Überströme

● **Repetitor zum Band 7**

Band 8

– Grundlagen der Vermittlungstechnik (mit Beiheft)

Grundlagen der Vermittlungstechnik – Schaltglieder der Vermittlungstechnik – Ortswählsysteme – Selbstwählferrdienst – Unterhaltungsdienst in Fernsprech-Vermittlungsstellen

● **Repetitor zum Band 8**

Band 9

– Übertragungstechnik

Elektroakustik – Leitungstechnik – Niederfrequenz-Verstärkertechnik – Trägerfrequenztechnik – Fernschreib- und Datenübertragungstechnik – PCM-Technik

● **Repetitor zum Band 9**

– Weitere Lehrbücher siehe 2. und 4. Umschlagseite –

Band 10

— Grundlagen der Schaltungs- und Meßtechnik

Anschluß- und Verbindungstechniken — Bauelemente, Bauteile —
Grundlagen der Schaltungstechnik — Niederspannungsnetz, Schutz-
maßnahmen und Installationen, VDE-Bestimmungen — Grundsätz-
liches über Messen und Prüfen

● **Repetitor zum Band 10**

Die Bände werden noch durch den **Sonderband „Grundlagen der Elektronik (mit Repetitor)“** ergänzt, der beim Institut zur Entwicklung moderner Unterrichtsmedien e.V., 28 Bremen 1, Bahnhofstraße 10, bestellt werden kann. Der Band ist wie folgt gegliedert:

Sonderband — Grundlagen der Elektronik

Meßtechnik — Halbleiter — Halbleiterdioden — Transistoren — Vier-
schichthalbleiter-Bauelemente — Elektronenröhren — RC-Glieder —
Kippstufen — Verknüpfungsglieder

● **Repetitor zum Band Grundlagen der Elektronik**

Allgemeines Prüfungswissen (2 Teile)

(für die Kräfte des BF-, BfT- und BPT-Dienstes)

● **Repetitor zum Band Allgemeines Prüfungswissen**

fernmeldelehrling.de

Wichtig zur Vorbereitung auf Eignungsfeststellungen und Prüfungen

Deutschlehre (mit Beiheft)

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

Rechenlehre

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

Die Lehrbücher können bestellt werden bei:

Deutsche Postgewerkschaft — Hauptvorstand — Verlag

6 Frankfurt 71 — Rhonestraße 2