

# Schall und Klang

Leitfaden der Elektroakustik für Architekten, Elektrotechniker  
und Studierende

Von

**Dr.-Ing. Fritz Bergtold**

Mit 214 Bildern im Text und 27 Tafeln



München und Berlin 1939

**Verlag von R. Oldenbourg**

**Copyright 1939 by R. Oldenbourg, München**

**Druck von R. Oldenbourg, München**

**Printed in Germany**

## Vorwort.

Nach einer grundlegenden und verständlichen Einführung in die praktische Elektroakustik besteht ein dringendes Bedürfnis. Diesem möchte ich mit dem vorliegenden Werk Rechnung tragen. Als erstrebenswert erschien mir dabei vor allem: Klares Herausarbeiten der hauptsächlichsten Gesichtspunkte, anschauliche und lebendige Abfassung, verständliche Sprache und scharfes Umreißen der grundlegenden Begriffe. Außerdem gab ich mir alle Mühe, das Buch so zu schreiben, daß es auf jede wesentliche Frage unmittelbar eingeht. Das ist für den Praktiker wichtig. Er kann nicht immer wieder mit dem Anfang des Buches beginnen. Dazu fehlen ihm Zeit und Ruhe. Daß hierbei einige Wiederholungen in Kauf genommen werden mußten, dürfte kaum stören. Die Wiederholungen beziehen sich auf die Kernpunkte, die etwa auch im Unterricht mehrmals betrachtet werden sollten. Überdies sind die Wiederholungen so gefaßt, daß dabei stets wieder Neues geboten wird oder daß eine jeweils andere Seite in den Vordergrund tritt.

Die Elektroakustik hat erst in den letzten Jahren große Bedeutung erlangt. Man baut heute Übertragungsanlagen, von denen außerordentlich viel verlangt wird, in jeder Größe. Dabei treten vielfache Schwierigkeiten auf. Diese sind gewiß zu einem Teil in dem noch geringen Alter der Übertragungstechnik begründet, wobei der Mangel an geschulten Fachleuten im Vordergrund steht. Der größte Teil der Schwierigkeiten rührt aber von folgendem Vorurteil her: Die Bauherren, die Architekten und die Raumgestalter betrachten elektroakustische Anlagen häufig als ein reines Zubehör, das sich nachträglich ohne weiteres in ein gegebenes Bauwerk und in bestimmt ausgestaltete Räume einfügen lassen muß und das darin hohe Ansprüche an die Wiedergabegüte restlos zu befriedigen hat.

Aus diesen Hinweisen folgt, daß ein Buch, wie das vorliegende, mehreren sich nur lose berührenden Leserkreisen dienen muß. Einerseits soll es eine Grundlage für die Schulung der Elektroakustiker bieten, die später Übertragungsanlagen zu bauen haben, andererseits soll es vor allem auch die Architekten in die Grundfragen der Elektroakustik einführen, um ihnen zu zeigen, wie sie beim Gestalten und beim Ausbau der Räume die Lautsprecherwiedergabe zu berücksichtigen haben, welche Lautsprecheranordnungen in Betracht kommen und was sonst für die Übertragungsanlagen vorzusehen ist. Schließlich aber hat ein

solches Buch über alle praktisch wichtigen Fragen Auskunft zu geben. Es soll z. B. zeigen, wie man Schwierigkeiten überwindet, die auftreten können, wenn gegebene Räume mit Übertragungsanlagen auszustatten sind oder wenn Forderungen gestellt werden, die sich unter Zuhilfenahme üblicher Mittel nicht ohne weiteres erfüllen lassen. Nebenbei will das Buch zwischen Architekten und Elektroakustikern vermitteln, indem es Anhaltspunkte dafür gibt, wie man sich auf einen mittleren Weg, der beiden Teilen bestens Rechnung trägt, zu einigen vermag.

Zu Studienzwecken ist es am günstigsten, das ganze Buch in der vorliegenden Reihenfolge durchzuarbeiten.

Den Architekten möchte ich zur Einführung die Abschnitte C und D sowie für die praktische Tätigkeit die Abschnitte E, F und G besonders warm ans Herz legen. Auch der Abschnitt O wird die Architekten vielleicht ein wenig unterstützen können.

Für die Elektroakustiker sind die Abschnitte D, P, J, G, F, H, K, L, M, N und O — etwa in der angegebenen Reihenfolge — am wichtigsten.

Sowohl die Architekten wie die Elektroakustiker werden später nicht umhin können, die allgemeinen Abschnitte A und B sowie die übrigen Teile des Buches durchzulesen.

Möge dieses Werk, das im Laufe der letzten Jahre allmählich die hier wiedergegebene Gestalt angenommen hat, zu einer weiteren Steigerung der Wiedergabegüte beitragen!

München, August 1939.

**F. Bergtold**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort . . . . .	III
<b>I. Grundlagen . . . . .</b>	<b>1</b>
A. Schall und Klänge . . . . .	1
1. Vorbemerkung . . . . .	1
2. Der Schall als grundlegender Begriff . . . . .	1
3. Der Schalldruck . . . . .	2
4. Ton und Klang, Geräusch und Knall sind Sonderarten des Schalles	2
5. Die Klangfarbe ist wesentlich . . . . .	3
6. Notwendiger Frequenzbereich . . . . .	4
7. Frequenzabhängigkeit und Frequenzkennlinie . . . . .	5
8. Klirrverzerrungen und Klirrgrad . . . . .	6
9. Klirrgradkennlinien . . . . .	7
B. Schall und Gehör . . . . .	8
1. Das Hörempfinden . . . . .	8
2. Schalleistung und Lautstärke . . . . .	8
3. Die Grenzlinien und die Hörfläche . . . . .	9
4. Die Hörkennlinien . . . . .	10
5. Hörempfinden und Lautstärkereglung . . . . .	11
6. Die grundsätzliche Frequenzabhängigkeit der Lautstärkereglung	12
7. Dezibel . . . . .	13
8. Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen Schalleistungsdichte	14
und Schalldruck . . . . .	14
9. Altes und neues Phon . . . . .	15
10. Zusammenwirken mehrerer Schallquellen . . . . .	15
11. Nachhall und Anhall . . . . .	16
12. Silbenverständlichkeit und Satzverständlichkeit . . . . .	17
C. Schall und Raum . . . . .	19
1. Schallwellen sind räumliche Gebilde. . . . .	19
2. Die Schallwellen werden verschluckt oder zurückgeworfen . . . . .	19
3. Einfaches Echo . . . . .	20
4. »Schetter«-Echo in geschlossenen Räumen . . . . .	21
5. Der Nachhall . . . . .	21
6. Ein richtig bemessener Nachhall erweist sich als notwendig! . . .	22
7. Die Nachhalldauer ist beeinflussbar . . . . .	23
8. Stehende Wellen — eine unangenehme Folge des zurückgeworfenen	24
Schalles . . . . .	24
9. Stehende Wellen lassen sich bekämpfen! . . . . .	24
10. Schall im Freien . . . . .	24
D. Die Bestandteile der Übertragungsanlage . . . . .	26
1. Die vier Hauptteile . . . . .	26
2. Die übliche Rundfunkempfangsanlage als vollständige Einrichtung	27

	Seite
3. Die Rundfunkempfangsanlage als Aufnahmeeinrichtung . . . . .	28
4. Der Drahtfunk als Aufnahmeeinrichtung . . . . .	28
5. Der Plattenspieler . . . . .	29
6. Die Mikrophoneigenschaften . . . . .	29
7. Die Mikrofonarten . . . . .	32
8. Gewöhnliche Mikrophone und Richtmikrophone . . . . .	33
9. Der Verstärker . . . . .	35
10. Die Verstärkergruppen . . . . .	36
11. Die Lautsprecher . . . . .	37
12. Die Strahler . . . . .	39
13. Schallwände und Schallkästen . . . . .	40
14. Besondere Richtstrahler . . . . .	42
15. Eingangs- und Ausgangsleitungen . . . . .	45
<b>II. Die Wiedergaberäume . . . . .</b>	<b>49</b>
E. Gestaltung der Wiedergaberäume . . . . .	49
1. Vorbemerkung . . . . .	49
2. Grundsätzliches . . . . .	49
3. Der richtige Rauminhalt . . . . .	50
4. Vermeidung des einfachen Echos . . . . .	51
5. Einfluß auf die Schallverteilung . . . . .	52
6. Bekämpfung stehender Wellen, Schetter-Echos und Raumresonanzen . . . . .	54
7. Die Hauptabmessungen . . . . .	56
8. An- und Einbauten . . . . .	56
9. Der Entwurf des Wiedergaberaumes . . . . .	57
10. Versuche mit Nachbildungen . . . . .	58
11. Die Gestaltung der Versammlungsplätze . . . . .	58
F. Ausbau der Wiedergaberäume . . . . .	59
1. Grundsätzliches . . . . .	59
2. Die Dämpfung . . . . .	60
3. Dämpfung und Nachhall . . . . .	61
4. Einfluß des Rauminhaltes . . . . .	62
5. Die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung . . . . .	64
6. Grundsätzliches über die Wirkung dämpfender Belegungen . . . . .	66
7. Anordnung der dämpfenden Belegungen . . . . .	67
8. Genauigkeit der Nachhall-Vorausberechnung . . . . .	68
G. Anordnung der Lautsprecher, Mikrophone und sonstigen Einrichtungen . . . . .	69
1. Grundsätzliches über die Schallquellenanordnung . . . . .	69
2. Über die Praxis der Lautsprecheranordnung . . . . .	69
3. Der Sinn der Schallquellenaufteilung . . . . .	70
4. Die Schallversorgung des Wiedergaberaumes von einer Stelle aus . . . . .	71
5. Zusätzliche Lautsprecher . . . . .	72
6. Schallversorgung geschlossener Räume durch verteilte Lautsprecher . . . . .	72
7. Bekämpfung der akustischen Rückkopplung . . . . .	73
8. Teilweise besprochene Räume . . . . .	75
9. Der Sonderfall des sehr großen Raumes . . . . .	76
10. Lautsprecher-Anordnung auf freien Plätzen . . . . .	76
11. Zentralen . . . . .	79
12. Die räumliche Anordnung der Verstärker . . . . .	80

	Seite
H. Nachträgliche Verbesserungen . . . . .	82
1. Vorbemerkung . . . . .	82
2. Behelfsmäßiger Ausgleich der Folgen eines zu großen Nachhalles . . . . .	82
3. Beseitigung störender Echos . . . . .	83
4. Verbesserung der Verständlichkeit bei richtigem Nachhall . . . . .	83
5. Die Bekämpfung der akustischen Rückkopplung . . . . .	83
<b>III. Die elektrische Einrichtung . . . . .</b>	<b>85</b>
J. Auswahl der Teile, Planung und Aufbau der Anlage . . . . .	85
1. Ein paar Worte zur Auswahl der Teile . . . . .	85
2. Grundsätzliche Bemerkungen über die Planung . . . . .	86
3. Der Bedarf an Tonfrequenzleistung als wesentliche Grundlage . . . . .	87
4. Die Nennleistungen der Lautsprecher und Verstärker . . . . .	87
5. Kopfhöreranschluß an Verstärkeranlagen . . . . .	92
6. Die Sicherheitsstufen . . . . .	92
7. Das Anschalten der Lautsprecher . . . . .	93
8. Grundsätzliches zur Aufstellung der Anlage . . . . .	94
9. Drei Gesamtschaltungen als Beispiele . . . . .	94
10. Überblick über die Leitungen . . . . .	95
11. Eingangs- und Ausgangsleitungen . . . . .	96
12. Die Leitungen für die Antennenanlage . . . . .	97
13. Die Netzleitung und die Verstärker-Erdleitung . . . . .	97
14. Die Lautsprecher-Erregerleitung . . . . .	98
15. Die Antenne . . . . .	98
16. Das Postanschlußglied . . . . .	99
K. Anpassung . . . . .	99
1. Grundsätzliche Bemerkungen . . . . .	99
2. Betrachtungen an Hand der Kennlinienbilder . . . . .	100
3. Anpassungsübertrager und Anpassungsschaltung . . . . .	103
4. Die Wirkungsweise des Anpassungsübertragers . . . . .	104
5. Der zahlenmäßige Zusammenhang . . . . .	105
6. Über die Praxis des Anpassens . . . . .	105
7. Folgen einer falschen Anpassung an den Verstärkerausgang . . . . .	106
8. Ein einziger Lautsprecher . . . . .	107
9. Mehrere gleiche Lautsprecher für gleiche Leistungen . . . . .	108
10. Mehrere Lautsprecher für verschiedene Leistungen . . . . .	109
11. Kopfhöreranschluß an Übertragungsanlagen . . . . .	110
12. Wahrung der Anpassung beim Abschalten einzelner Lautsprecher oder Lautsprechergruppen . . . . .	111
L. Lautstärkeregelung . . . . .	112
1. Einfachste Fälle . . . . .	112
2. Umgehung der Erdungsschwierigkeiten . . . . .	113
3. Rücksicht auf die Innenwiderstände . . . . .	114
4. Gegenseitig unabhängige Regelung gemeinsam gespeister Lautsprecher . . . . .	114
5. Der L-Regler und sein Ersatz doch nicht vollkommen . . . . .	117
6. Der T-Regler . . . . .	118
7. Vereinfachte T-Regler . . . . .	119
8. T-Regler vor Lautsprechern? . . . . .	120
9. T-Regler vor und zwischen Verstärkern . . . . .	120
10. Die Fernschaltung des Verstärkers . . . . .	122

— VIII —

	Seite
M. Tonblenden und Entzerrer . . . . .	123
1. Vorbemerkung . . . . .	123
2. Die Tonblenden . . . . .	125
3. Tonblenden für beide Enden des Frequenzbereiches . . . . .	125
4. Entzerrer . . . . .	126
5. Entzerrung durch Gegenkopplung . . . . .	128
N. Planung der Anlage . . . . .	129
1. Die wesentlichen Grundlagen . . . . .	129
2. Fragen über die Wiedergaberäume und Freianlagen . . . . .	130
3. Fragen über die Aufgaben der Anlage . . . . .	130
4. Fragen über Stromversorgung, Sicherheitsgrad und Bedienbarkeit . . . . .	131
5. Der Gang der eigentlichen Planung . . . . .	131
O. Störungsbekämpfung . . . . .	132
1. Die Arten der Störungen . . . . .	132
2. Das von den Zuhörern herrührende Störgeräusch . . . . .	132
3. Die in der Übertragung selbst begründeten Störgeräusche . . . . .	133
4. Von außen her eindringendes Störgeräusch . . . . .	134
5. Berechnungsbeispiel . . . . .	137
P. Beurteilung und Bewertung der Übertragungsanlagen . . . . .	138
1. Die Hauptgesichtspunkte für die Beurteilung und Bewertung . . . . .	138
2. Die Wiedergabeeigenschaften . . . . .	138
3. Die Betriebseigenschaften . . . . .	140
4. Bauteile und Leitungen . . . . .	140



# I. Grundlagen.

## A. Schall und Klänge.

### 1. Vorbemerkung.

Der Schall und der Klang sowie dessen Sonderarten: der Ton, das Geräusch und der Knall sind unabhängig von unserem Gehör vorhanden. Dennoch können wir schon in diesem einleitenden Teil des Buches nicht ganz darauf verzichten, das Gehör als eine Grundlage der Betrachtungen hinzunehmen. Wir beschränken uns dabei auf das Allernotwendigste. Genaueres über die hier wichtigen Eigenheiten des Gehörs bringt der Teil C.

### 2. Der Schall als grundlegender Begriff.

Unter Schall verstehen wir Druckschwankungen, wobei auf jede einzelne Schwankung (einzelne Schallwelle) eine kurze Zeitspanne — von weit unter  $\frac{1}{100\,000}$  bis  $\frac{1}{5}$  Sekunden — entfällt. Für unser Gehör kommen jedoch nur die Schallwellen in Betracht, deren zugehörige Zeitspannen zwischen  $\frac{1}{20\,000}$  und  $\frac{1}{16}$  Sekunden liegen. Die länger als  $\frac{1}{16}$  Sekunde dauernden Schallwellen werden »Infraschall«, die kürzer als  $\frac{1}{20\,000}$  Sekunde dauernden Schallwellen »Ultraschall« genannt.

An Stelle der Zeitdauer der einzelnen Schallwelle gibt man meist ihre Frequenz (Häufigkeit) an. Das ist die Zahl der auf eine Sekunde entfallenden Schallwellen. Beträgt die Dauer einer Schallwelle  $\frac{1}{200}$  Sekunde, so kommt das einer Frequenz von 200 Schallwellen je Sekunde gleich.

Statt »Schallwellen je Sekunde« sagt man meist »Hertz« (abgekürzt Hz). Um für höhere Frequenzen große Zahlen zu vermeiden, gibt man diese Frequenzen fast immer in Kilohertz (abgekürzt kHz) an. Beispiel: 5 kHz = 5000 Hz.

Der Schall umfaßt also im engeren Sinn alle Luftdruckschwankungen mit den Frequenzen 16 bis 20000 Hertz. Ob wir diese Druckschwankungen im Einzelfall hören oder nicht, spielt dabei keine ausschlaggebende Rolle.

Die von der Schallquelle jeweils abgestrahlten Schallwellen entsprechen einer Schalleistung, die z. B. in Mikrowatt oder Watt gemessen werden kann. Diese Schalleistung überträgt sich in den Raum, so daß an jeder Stelle des Raumes jeweils eine bestimmte Schalleistungs-

dichte vorhanden ist. Diese Leistungsdichte läßt sich in Mikrowatt je  $\text{cm}^2$  ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) oder in Watt je  $\text{cm}^2$  angeben. Sie wird vielfach »Schallstärke« genannt.

### 3. Der Schalldruck.

Leider benutzt man neben der Schalleistungsdichte, die allein völlig genügen würde, heute noch vielfach den Begriff des Schalldruckes. Hierfür gilt folgendes:

Der Schalldruck, der an einer bestimmten Stelle eines Raumes herrscht, ist gleich dem höchsten Augenblickswert der dort auftretenden Abweichungen vom Druck der ruhenden Luft.

Das Maß für diesen Schalldruck ist das Mikrobar (abgekürzt  $\mu\text{b}$ ). Ein Mikrobar bedeutet dasselbe wie ein Dyn je  $\text{cm}^2$ , was rund einem Milligramm je  $\text{cm}^2$  gleichkommt.

Früher verstand man — im Gegensatz hierzu — unter Schalldruck vielfach das, was heute »Schallstrahlungsdruck« heißt. Der Schallstrahlungsdruck ist ein in der Fortpflanzungsrichtung des Schalles entstehender Druck, dem die Druckschwankungen überlagert sind. Dieser Druck ist wesentlich geringer als der oben erläuterte Schalldruck.

### 4. Ton und Klang, Geräusch und Knall sind Sonderarten des Schalles.

Der Ton weist — physikalisch aufgefaßt — nur Schallwellen einer einzigen Frequenz auf. Seine Schallwellen können also nicht in mehrere Schallwellen mit verschiedenen Frequenzen zerlegt werden. Die Bezeichnung »reiner Ton« soll das noch besonders unterstreichen. Man spricht nämlich ganz allgemein auch bei solchen Schallarten von Tönen, bei denen ein einzelner Ton — und zwar meist der tiefste — besonders stark hervortritt.

Der Klang setzt sich aus Tönen verschiedener Höhe zusammen. Dabei unterscheidet man den Grundton, die Obertöne und als besondere Obertöne gelegentlich noch die Formanten. Der Grundton, der bei Musikinstrumenten meist weitaus im Vordergrund steht, bestimmt die Tonhöhe. Die Obertöne, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundtonfrequenz betragen, geben dem Ton die Klangfarbe. Obertöne, deren Frequenzen ziemlich unabhängig von der Höhe des Grundtones sind, heißen »Formanten« und spielen vor allem bei der Sprache eine ausschlaggebende Rolle. Sie kennzeichnen die verschiedenen Laute. Obertöne und Formanten können — wie z. B. auch die Grundtöne der Musikinstrumente — entweder immer wieder ausklingen (Beispiel: die Grundtöne des Klaviers) oder ihre Werte beibehalten (Beispiel: die Grundtöne einer Flöte).

Das Geräusch ist eine zweite Abart des Schalles. Es enthält gegenüber dem Klang meist keinen ausgeprägten Grundton. Seine Einzeltöne stehen in keiner gesetzmäßigen Wechselbeziehung. Sie erstrecken sich

über einen größeren Frequenzbereich, und zwar meist ziemlich weit nach oben. Die gesamte Schalleistung ist über diesen Frequenzbereich in der Regel weit gleichmäßiger verteilt als beim Klang. Der Wert der Lautstärke spielt für die Unterscheidung einzelner Geräusche eine weit größere Rolle als für die Unterscheidung einzelner Klänge.

Als besondere Art des Geräusches ist schließlich der Knall zu erwähnen, der sich aus rasch abklingenden Tönen zusammensetzt.

### 5. Die Klangfarbe ist wesentlich.

Klänge gleicher Höhe können ungleich klingen: Wird ein und derselbe Klang durch eine Flöte und durch eine Geige hervorgebracht, so ist ein deutlicher Unterschied zu merken. Wir sagen, die beiden Klänge haben verschiedene »Klangfarben«. Die Klangfarbe, die den Klang also besonders kennzeichnet, rührt daher, daß der Klang — wie schon bemerkt — außer dem Grundton noch Obertöne enthält. So ist z. B. jeder Geigen-Grundton von beträchtlichen Obertönen begleitet, während die Flöte nur schwache Obertöne hervorbringt. Reich an besonderen Obertönen — an Formanten — ist unsere Sprache. Das erklärt, daß wir jeden Vokal in den verschiedensten Tonhöhen sprechen können und ihn dennoch mit Sicherheit als diesen erkennen.

Bei Schwächung der hohen Töne werden auch die Oberwellen zurückgedrängt, was eine dunkle Klangfarbe bewirkt. Helle Klangfarbe ergibt sich durch Schwächung der tiefen Töne.

Schwächung der tiefen Töne ist — unter Beibehaltung der Gesamtlautstärke — gleichbedeutend mit Verstärkung der hohen Töne und demgemäß mit einem Herausheben der Obertöne und Formanten.

Man sollte meinen, die natürliche Klangfarbe sei besonders erwünscht. Die Erfahrung lehrt aber, daß für Musikwiedergabe heute noch vielfach eine dunkle Klangfarbe bevorzugt wird (Bild A 1). Dafür sind vorwiegend zwei Gründe maßgebend:

1. Prasseln, Krachen und Knattern — kurz alle Störgeräusche, die die Tonwiedergabe so unangenehm beeinträchtigen können — umfassen vorwiegend sehr hohe Frequenzen. Daher wird bei Einstellung einer dunklen Wiedergabe die Wiedergabe störungsfreier.
2. Für die Wiedergabe der tiefsten Töne fehlt es an genügender Schalleistung. Außerdem liegen die Resonanzfrequenzen der Laut-

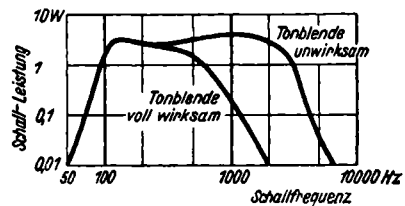


Bild A 1.\*)

\*) Die voll wirksame Tonblende schwächt im oberen Teil des Schallfrequenzbereiches die wiedergegebenen Töne beträchtlich — ein Anzeichen für die Beliebtheit der dunklen Klangfarbe.

sprecher häufig noch zu hoch. Durch Betonung der tiefen Töne werden die Oberwellen der tiefsten, zu schwach wiedergegebenen Töne bevorzugt, was uns die tiefsten Töne vortäuscht.

Ein dritter Grund verliert mehr und mehr an Bedeutung:

3. Durch die Wandlungen, die die Töne bei der Übertragung durchmachen, entstehen zusätzliche Oberwellen, die ursprünglich nicht vorhanden sind. Durch Einstellen einer dunklen Klangfarbe werden diese störenden Oberwellen geschwächt, was die Wiedergabe angenehmer gestaltet.

Für Sprachwiedergabe hingegen ist nicht selten ein Aufhellen der Klangfarbe günstig, was in Rundfunkgeräten durch den »Sprechschalter« geschehen kann (siehe unten). Die vorteilhafte Wirkung der helleren Klangfarbe ergibt sich aus folgendem:

1. Für die Verständlichkeit der Sprache sind die tiefen Töne unterhalb 300 Hertz ziemlich belanglos.
2. Die Konsonanten, die die Sprache klar machen, setzen sich im wesentlichen aus hohen Tönen zusammen.
3. Tiefe Töne hallen meist besonders stark nach, wodurch die jeweils nachfolgenden Silben teilweise verdeckt werden.

## 6. Notwendiger Frequenzbereich.

Aus den Betrachtungen über die willkürliche Einstellung der Klangfarbe folgt, daß es nicht unbedingt nötig ist, den gesamten Frequenzbereich gleichmäßig wiederzugeben.

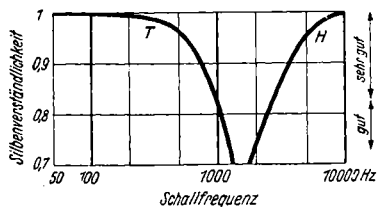


Bild A 2. \*)

Auf die ganz tiefen Frequenzen (etwa unter 100 Hz) können wir bei der Wiedergabe verhältnismäßig leicht verzichten (für Sprache siehe Bild A 2, Kennlinie *T*). Das hängt mit den Oberwellen zusammen: Wenn wir von einem tiefen Ton nur die ihn kennzeichnenden Oberwellen hören, fügen wir unbewußt den Grundton hinzu und ver-

meinen, den tiefen Ton selbst zu empfinden. Aus diesem Grunde merken wir kaum, daß ein Rundfunkempfänger uns die unter 100 oder gar die unter 200 Hertz liegenden Töne unterschlägt. Aus dem gleichen Grund

\*) Die Kennlinie *T* gilt für die untere und die Kennlinie *H* für die obere Grenze des Übertragungs-Frequenzbereiches. Beispiel für die Kennlinie *T*: Beim Abschneiden aller Töne mit Frequenzen unter 1000 Hz beträgt die Verständlichkeit noch etwas mehr als 80%. Beispiel für die Kennlinie *H*: Beim Abschneiden aller Töne mit Frequenzen über 5000 Hz beträgt die Verständlichkeit noch rd. 95%. Mit einem Frequenzbereich von 1000 bis 5000 Hz ergibt sich somit eine Verständlichkeit von etwa  $0,8 \times 0,95 = 0,76$  oder 76%.

ist die Verständlichkeit der Sprache noch gut, wenn die Töne aller Frequenzen unter 800 Hertz nicht wiedergegeben werden.

Unsere Bescheidenheit bezüglich der oberen Tonfrequenzen (Bild A 2, Kennlinie *H*) erklärt sich gerade umgekehrt: Bei den hohen Tönen spielen die Oberwellen nicht die große Rolle, die ihnen bei den tiefen Tönen zufällt. Hier stehen die Grundtöne im Vordergrund. Sie reichen im großen und ganzen aber nur bis etwa 6000 Hertz hinauf. (Der Bereich von 6000 bis 20000 Hertz enthält vorwiegend Obertöne.) Demnach empfinden wir eine Wiedergabe, bei der die über 6000 Hertz liegenden Frequenzen fehlen, noch als zufriedenstellend und beklagen uns nicht einmal sehr, wenn die Grenze bis auf 4500 Hertz heruntergesetzt wird, was bei Fernempfang und Schallplattenwiedergabe heute noch meist der Fall ist.

### 7. Frequenzabhängigkeit und Frequenzkennlinie.

Jede Übertragungsanlage soll den gesamten Tonfrequenzbereich möglichst gleichmäßig übertragen. Die Frequenzabhängigkeit der Übertragung muß demnach gering gehalten werden.

Um den Grad der Frequenzabhängigkeit zu veranschaulichen, entwirft man von Teilen der Übertragungsanlage oder auch von der Gesamtanlage Frequenzkennlinien, in denen das Verhältnis der Ausgangsspannung oder der Ausgangsschalleistung zu der Eingangsspannung abhängig von der Frequenz aufgetragen wird. Die so erhaltenen Kennlinien sollen zügig verlaufen. Starke Schwankungen in dem Kennlinienverlauf und vor allem schroffe Übergänge von großen auf geringe Werte oder umgekehrt deuten immer irgendwelche unerwünschten Resonanzlagen an. Lediglich am Anfang und Ende des Wiedergabebereiches sind schroffer Anstieg und Abfall meist erwünscht. Im übrigen ist es häufig ein günstiges Zeichen, wenn die Frequenzkennlinie einigermaßen waagrecht verläuft.

In Anlagen, deren Teile ungünstige Frequenzkennlinien haben, läßt man die Frequenzkennlinie eines oder mehrerer Anlageteile vom geraden Verlauf abweichen, um so eine günstige Gesamtkennlinie zu erhalten. Da z. B. viele Lautsprecher die ganz hohen und ganz tiefen Töne schwächer wiedergeben als die mittleren Töne, sorgt man mitunter dafür, daß die Frequenzkennlinien der Verstärker an den Grenzen des Übertragungsbereiches ansteigen und erst jenseits dieser Grenzen stark abfallen. Hieraus folgt, daß Einzelkennlinien von Verstärkern oder Lautsprechern für sich genommen nicht sehr viel erkennen lassen.

Von Anlagen, die frequenzabhängig arbeiten, sagt man, sie weisen »lineare Verzerrungen« auf. Manchmal wird der Sinn der Bezeichnung »lineare Verzerrung« auch enger gefaßt, wobei man darunter nur versteht, daß die Wiedergabe einseitig abfällt, daß sie also mit zunehmender oder mit abnehmender Frequenz schwächer wird. Ein allgemein gültiges

Maß für die lineare Verzerrung besteht nicht. Mitunter gibt man die lineare Verzerrung in »Dezibel« als Abweichung von dem gewünschten Kennlinienverlauf an (wegen Dezibel s. S. 13).

### 8. Klirrverzerrungen und Klirrgrad.

Neben einer Beeinflussung des Frequenzganges, die man vielfach als lineare Verzerrung bezeichnet, tritt bei der Tonwiedergabe auch eine Klirrverzerrung auf. Diese besteht darin, daß in der Übertragungseinrichtung zu den Tönen, die übertragen werden sollen, andere Töne hinzukommen, die mit den übertragenen Tönen wohl in Zusammenhang stehen, in ihnen aber ursprünglich nicht enthalten sind. Diese zusätzlichen Töne werden vor allem aus den Oberwellen und daneben auch aus den Differenztönen der übertragenen Töne gebildet. Die Klirrverzerrungen entstehen vorwiegend in der Verstärker-Endstufe.

Als Maß für die Klirrverzerrung dient der Klirrgrad, der gelegentlich auch »Klirrfaktor« genannt wird. Dieser Klirrgrad gründet sich darauf, daß man die Anordnung mit einem reinen Ton oder einer zeitlich sinusförmig verlaufenden Spannung steuert. Man gibt dabei als Klirrgrad den Wert der Oberwellen der Ausgangsspannung als Bruchteil oder in % des Grundwellenwertes der Ausgangsspannung an. 15% Klirrgrad heißt demzufolge, daß die zusätzlich in der Anlage entstehenden Oberwellen insgesamt gleich dem 0,15fachen der übertragenen Grundwelle sind.

Die Bezeichnung »Klirrgrad« rührt daher, daß bei starken Klirrverzerrungen tatsächlich ein Klirren hörbar wird. Früher, als man noch magnetische Lautsprecher benutzte, in denen sich eine Eisenzunge zwischen zwei Magnetpolen bewegt, kam es vor, daß diese Zunge an den Polen anslug. Die hierbei auftretenden Klirrverzerrungen waren deutlich als Klirren hörbar.

Von den bei Klirrverzerrung entstehenden Oberwellen spielen für den Klirrgrad fast stets nur die zweite und dritte Oberwelle eine Rolle. (Die Frequenz der zweiten Oberwelle liegt doppelt so hoch und die Frequenz der dritten Oberwelle dreimal so hoch wie die der zugehörigen Grundwelle.) Der Gesamtwert ( $a_g$ ) einer zweiten und einer dritten Oberwelle hängt mit den Werten ( $a_2$  und  $a_3$ ) der Einzelwellen so zusammen:

$$a_g = \sqrt{a_2^2 + a_3^2}.$$

Daraus folgt, daß von den beiden Oberwellen meist nur eine einzige, und zwar die größere, für den Klirrgrad maßgebend ist. In einfachen Endstufen mit Fünfpolröhren spielt die dritte Oberwelle die Hauptrolle. In sämtlichen Gegentaktstufen kommt **nur** die dritte Oberwelle in Betracht. Wir haben es daher in Verstärkeranlagen vorwiegend mit der dritten Oberwelle zu tun.

Wenn auch die Durchschnitts- oder die Höchstwerte des Klirrgrades allgemein als Maße für die Klirrverzerrung dienen, geben diese Werte doch keine zuverlässigen Anhaltspunkte für die praktische Auswirkung der Klirrverzerrung. Um das zu begreifen, brauchen wir nur an die alten Lautsprecher mit der zwischen zwei Polen schwingenden Eisenzunge zurückzudenken. Man kann bei diesem Lautsprecher das bei Übersteuerung auftretende Klirren dadurch abdämpfen und so weniger unangenehm machen, daß man an den Polen Gummi- oder Lederpuffer anbringt. In diesem Fall wird die Verzerrung, gemessen am Klirrgrad, durch die weitere Beschränkung des Bewegungsbereiches der Zunge noch erhöht. Sie klingt aber weniger unangenehm als vorher. Daraus folgt: Die Verzerrung macht sich um so unangenehmer geltend, je schärfer sie einsetzt. Wir müßten demnach neben dem Wert des Klirrgrades seine Einsatzschärfe beachten. Da aber auch vor Eintritt der eigentlichen Übersteuerung stets ein gewisser Klirrgrad vorhanden ist, handelt es sich — genau genommen — nicht nur um die Schärfe des Klirrgrad-einsatzes, sondern um alle Klirrgrad-Änderungen, die sich abhängig von der Aussteuerung ergeben: Die Klirrverzerrungen sind um so unangenehmer, je schroffer sich der Klirrgrad abhängig von der Aussteuerung ändert. Daneben ist natürlich der Durchschnittswert des Klirrgrades von Bedeutung.

### 9. Klirrgradkennlinien.

Da der Klirrgrad als einzelne Zahl kein genaues Maß für die Verzerrung bedeutet, trägt man seinen Wert vielfach abhängig von der Aussteuerung oder auch abhängig von der ausgesteuerten Leistung auf. Der Verlauf der so erhaltenen Klirrgradkennlinien läßt eine wesentlich bessere Beurteilung der Klirrverzerrungen zu als die Angabe eines einzigen Zahlenwertes.

#### **Zusammenfassung:**

1. Der Frequenzbereich der hörbaren Töne erstreckt sich ungefähr von 16 bis 10000 Hertz.
2. Jeder Klang hat eine ihm eigene, durch Obertöne erzeugte Klangfarbe.
3. Der unbedingt wiederzugebende Frequenzbereich reicht für Sprache von 300 bis 2500 Hertz und für Musik von 100 bis 4500 Hertz.
4. Bei höheren Anforderungen an die Klanggüte ist eine möglichst gleichmäßige Übertragung über den gesamten Tonfrequenzbereich (und außerdem ein geringer Klirrgrad) anzustreben.
5. Die elektrische Schallübertragung geschieht im allgemeinen frequenzabhängig, was durch Frequenzkennlinien veranschaulicht wird.
6. Bei der elektrischen Schallübertragung treten Klirrverzerrungen auf. Das heißt: Es bilden sich dabei zusätzliche Töne. Als ungefähres Maß der Klirrverzerrungen dient der Klirrgrad. Bessere Anhaltspunkte geben Klirrgradkennlinien.

## B. Schall und Gehör.

### 1. Das Hörempfinden.

Die auf S. 1 gemachte Angabe, unser Hörempfinden reiche von 16 bis 20000 Hertz, ist ungenau. Sie läßt nämlich die für die Grenzen unseres Hörempfindens wichtige Schalleistungsdichte (s. unten) unberücksichtigt. Nimmt die Schalleistungsdichte eines Tones mehr und mehr ab, so hören wir ihn schließlich nicht mehr. Wird anderseits die Schalleistungsdichte immer größer, so geht das Hörempfinden schließlich in ein Schmerzgefühl über, das uns zwingt, die Ohren zuzuhalten.

Damit wir irgendeinen Ton hören, muß seine Schalleistungsdichte in gegebenen Grenzen liegen. Diese Grenzen sind stark frequenzabhängig, was man am besten durch ein Kennlinienbild veranschaulicht.

### 2. Schalleistung und Lautstärke.

Die Endstufe des Rundfunkgerätes oder des Verstärkers betreibt den angeschlossenen Lautsprecher dadurch, daß sie elektrische Leistung an ihn abgibt. Ein großer Teil dieser Leistung geht im Lautsprecher verloren, während ein kleiner Teil davon durch den Lautsprecher in Schalleistung verwandelt wird. Da die Schalleistung hierbei umgeformte elektrische Leistung darstellt, können wir sie natürlich auch in Watt oder — ihrer Kleinheit wegen — in Mikrowatt ( $= 10^{-6}$  Watt) oder sogar in Picowatt ( $= 10^{-12}$  Watt) angeben.

Die vom Lautsprecher abgegebene Schalleistung erfüllt den ganzen Raum, in dem die Wiedergabe stattfindet. Wir nehmen aber nicht die gesamte Schalleistung wahr, sondern nur den Teil, der unsere Ohren trifft. Demgemäß hat für das Gehör nicht die Schalleistung selbst, sondern die auf eine bestimmte Fläche — z. B. auf einen Quadratcentimeter — auftreffende Schalleistung Bedeutung. Diese Schalleistung je Flächeneinheit bezeichnet man sinngemäß als »Schalleistungsdichte« und gibt sie z. B. in Picowatt je Quadratcentimeter ( $\text{pW}/\text{cm}^2$ ) an. Die Schalleistungsdichte können wir mit Meßgeräten bestimmen.

Für die Lautstärke, die wir mit unseren Ohren empfinden, ist die Schalleistungsdichte kein brauchbares Maß. Das erkennen wir sehr einfach aus folgender Überlegung: Es ist möglich, die Luft mit einer Frequenz von 10 Hertz zu erschüttern. Dieser Erschütterung entspricht eine gewisse Zahl von Mikrowatt je Quadratcentimeter. Da wir — wie eingangs bemerkt — Frequenzen unter 16 Hertz nicht hören können, ist dieser in Mikrowatt je Quadratcentimeter meßbare »Ton« für unser Empfinden nicht vorhanden.

Als Maß unseres Lautstärkeempfindens hat man deshalb das »Phon« eingeführt. Das Phonmaß gründet sich auf folgende drei Punkte:



1. Als Ausgangspunkt dient die eben noch hörbare Lautstärke eines Tones von 1000 Hertz (Null Phon; zugehörige Schalleistungsdichte nach neuer Festlegung  $10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>, früher  $2,5 \cdot 10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup> oder auch  $2,6 \cdot 10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>, s. a. S. 15).
2. Da unser Lautstärkeempfinden stark frequenzabhängig ist, vergleicht man die Lautstärken aller Töne mit den Lautstärken eines Tones von 1000 Hertz.
3. Das Phonmaß paßt sich der Tatsache an, daß wir die Steigerung der Schalleistungsdichte von z. B. 10 Picowatt je cm<sup>2</sup> auf 100 Picowatt je cm<sup>2</sup> ungefähr ebenso empfinden wie eine Steigerung der Schalleistungsdichte von z. B. 100 Picowatt je cm<sup>2</sup> auf 1000 Picowatt je cm<sup>2</sup>.

Als Beispiel werden hier einige Lautstärkewerte (neues Phonmaß) für verschiedene im täglichen Leben vorkommende Geräusche genannt:

Mindestgeräusch im Freien (ruhiger Park)	. 15 bis 20 Phon	
Flüstern . . . . .	20	» 30 »
Ticken der Uhren . . . . .	20	» 40 »
Geräusche in Wohnräumen . . . . .	20	» 40 »
Geräusche in Büros . . . . .	40	» 60 »
Großes Orchester. . . . .	30	» 90 »
Gespräch . . . . .	50	» 60 »
Gaststätte, Rundfunkwiedergabe, Straßenlärm	40	» 80 »
Rufen . . . . .	70	» 80 »
Kraftrad, Lastwagen . . . . .	70	» 100 »
Flugzeugkabine . . . . .	80	» 110 »
Kesselschmiede. . . . .	110	» 120 »

### 3. Die Grenzlinien und die Hörfläche.

Bild B 1 zeigt — abhängig von der Frequenz — zwei Grenzlinien. Die obere Grenzlinie stellt die Schmerzgrenze dar, an der für die einzelnen Töne das Hörempfinden in ein Schmerzgefühl übergeht. Die untere Grenzlinie deutet die Hörschwelle — die Hörgrenze — an, an der man die Töne gerade zu hören vermag.

Für das Hörempfinden kommt somit die gesamte von diesen beiden Grenzlinien eingeschlossene »Hörfläche« in Betracht. Die Hörfläche hat gemäß vielen (aber nicht allen) Untersuchungen zu beiden Seiten je eine Spitze (siehe Bild B 2). Solche Spitzen bedeuten, daß die Frequenzen 16 und 20000 Hertz nur bei ganz bestimmten Schalleistungsdichten wahrgenommen werden können. Die senkrechte Ausdehnung der Hörfläche erreicht für etwa 1500 Hertz ihren Höchstwert. Das bedeutet, daß für uns im Bereich von etwa 1500 Hertz einerseits sehr kleine Schalleistungsdichten wahrnehmbar und andererseits auch größere Leistungsdichten noch nicht schmerzhaft sind.

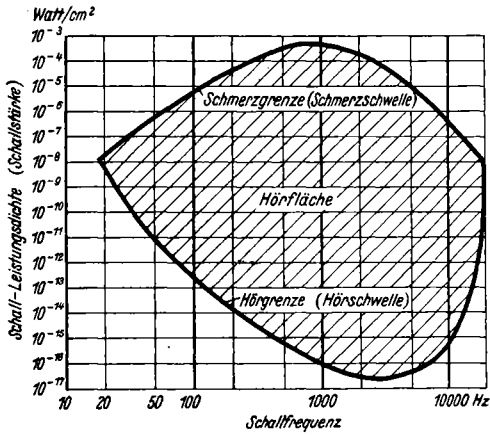


Bild B 1.\*)

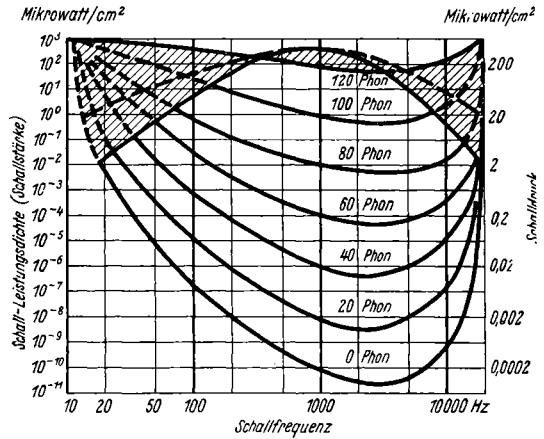


Bild B 2.\*\*)

#### 4. Die Hörkennlinien.

Die Hörfläche ist in Bild B 2 durch mehrere weitere Kennlinien in einzelne Streifen aufgeteilt. Diese Kennlinien, die die einzelnen Streifen voneinander trennen, heißen »Hörkennlinien«. Alle Punkte einer solchen Kennlinie entsprechen einem gleichen Lautstärkeempfinden. In diesem Sinn ist auch die untere Grenzlinie eine Hörkennlinie, da jedem ihrer Punkte die untere Grenze des Lautstärkeempfindens entspricht.

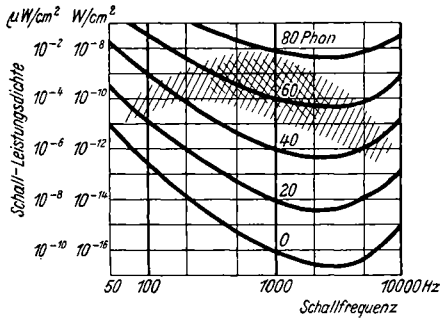


Bild B 3.\*\*\*)

Die zu den einzelnen Hörkennlinien eingetragenen Zahlenwerte, deren Maßeinheit — wie oben schon bemerkt — mit Phon bezeichnet wird, drücken das zugehörige Lautstärkeempfinden aus. Erstaunlich an den Kennlinien ist deren — vor allem für

\*) Der Verlauf der Grenzlinien ist vereinfacht. Die obere Grenzlinie wird auch anders angegeben (s. Bild B 2).

\*\*) Durch Linien gleicher Lautstärke unterteilte Hörfläche mit drei verschiedenen oberen Grenzlinien. (Die eine der drei Grenzlinien ist durch die Linie für 120 Phon gegeben.)

\*\*\*) Der von rechts oben nach links unten schraffierte Teil gilt für musikalische Darbietungen, der zusätzlich von links oben nach rechts unten schraffierte Teil für Sprachübertragung.