

Dipl.-Ing. oec. Wolfgang Tenbusch

# GRUNDLAGEN DER LAUTSPRECHER



**Der  
Klassiker**

Nach 26 Jahren wieder  
erhältlich. Völlig neu  
bearbeitet auf  
dem aktuellen  
Stand.

Mit einem Vorwort vom  
Vater der Lautsprecher

**KLANG+TON**  
EDITION

Dipl.-Ing. oec. Wolfgang Tenbusch

# **GRUNDLAGEN**

---

# **DER**

---

# **LAUTSPRECHER**

---

**KLANG+TON**

**EDITION**



Michael E. Brieden Verlag

## Impressum

### Herausgeber:

Michael E. Brieden

### Verlag:

Michael E. Brieden Verlag GmbH

Gartroper Straße 42, D-47138 Duisburg

Telefon: +49 (0)203 4292-0

E-Mail: [info@brieden.de](mailto:info@brieden.de), [www.brieden.de](http://www.brieden.de)

### Autor:

Dipl.-Ing. oec. Wolfgang Tenbusch

### Artdirection, Grafik und Layout:

Markus Bethke, Heike Jans, Claudia Hurtienne, Anna Immig

### Titelbild:

Thiel & Partner GmbH

### Druck:

Druckerei Himmer, Augsburg

### Bestell- und Versandservice:

Michael E. Brieden Verlag GmbH

Telefon: +49 (0)203 4292-111, Fax: +49 (0)203 4292-149

E-Mail: [info@brieden.de](mailto:info@brieden.de)

3. Auflage

### © by Michael E. Brieden Verlag GmbH

Alle Rechte der Veröffentlichung und Vervielfältigung nur mit schriftlicher Genehmigung erlaubt. Einige Beiträge enthalten ohne besonderen Hinweis Produkte, die unter das Waren- oder Patentschutzgesetz fallen. Werden technisches Know-how oder Rechte Dritter gewerblich genutzt, ist die Genehmigung des jeweiligen Inhabers einzuholen. Keine Kaufberatung durch die Redaktion. Funktionsgarantie für technische Hinweise wird nicht übernommen. Höhere Gewalt entbindet den Verlag von der Lieferungsfrist = AD Ersatzansprüche können in solchen Fällen nicht anerkannt werden. Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-944185-40-8

## 1 Vorwort zur dritten Auflage

Fast schon ein wenig im Dornröschenschlaf versunken, erlebt die Akustik eine erfreuliche Renaissance. Im Rahmen der allgemeinen Digitalisierung und Dynamikreduzierung ergibt sich schon fast automatisch das Bedürfnis nach einem warmen, natürlichen Klangerlebnis. Dies ist aber über die meisten Dockingstations in der MP3-dominierten Reproduktionswelt nicht immer ohne Weiteres zu erreichen. Deshalb macht es Sinn, aktualisiert mit den neuesten Erkenntnissen, sich wieder mit dem Thema der kreativen Gestaltung seiner eigenen Klangwelt zu beschäftigen. Mithilfe von Softwareprogrammen, basierend auf physikalischen Blockschaltbildern, können Entwickler, aber auch wissenschaftlich interessierte Laien nun das Verhalten von Lautsprechern schon vor dem ersten praktischen Handgriff hinreichend genau vorausberechnen. Ebenfalls zugenommen haben die Erkenntnisse in jener Vielzahl von Randbereichen wie der Psychoakustik, die die Beschäftigung mit Lautsprechern wieder zu einem so spannenden und übergreifenden Thema werden lassen. Die Flut an Informationen, die jetzt aus Gründen beruflicher oder rein hobbymäßiger Natur erfasst werden wollen, setzt einen umsichtigen und dennoch tiefer greifenden Einstieg in die Materie voraus. Die Beschäftigung mit Lautsprechern gehört eben nicht nur in die wissenschaftliche Schublade der Akustik, sondern betrifft auch viele verwandte Wissenschaften. Und noch immer ist nicht alles bis zum Letzten erforscht. Insbesondere in den Bereichen, wo die rein physikalische Schwingung auf den menschlichen Körper trifft und dort ein jeweils individuelles Klangerlebnis erzeugt. Dies alles in eine leicht verständliche Form zu bringen, die sowohl Laien als auch Fortgeschrittene anspricht, ist die besondere Leistung dieses Buches!

Dipl.-Ing. W. J. Tenbusch  
Duisburg, 2013

## Vorwort

Die wissenschaftliche Erforschung der Elektroakustik hat in den letzten Jahren geradezu rasante Fortschritte gemacht. Mithilfe von Ersatzschaltbildern können Forscher, aber auch wissenschaftlich interessierte Laien nun das Verhalten von Lautsprechern schon vor dem ersten praktischen Handgriff hinreichend genau vorausberechnen. Ebenfalls zugenommen haben die Erkenntnisse in jener Vielzahl von Randbereichen, die die Beschäftigung mit Lautsprechern zu einem so fruchtbaren und übergreifenden Thema werden lassen. Die Flut an Informationen, die aus Gründen beruflicher oder rein privater Natur erlernt werden wollen, setzt einen umsichtigen und vorbehaltlosen Einstieg in die Materie voraus. Lautsprecher gehören eben nicht nur in die wissenschaftliche Schublade der Akustik, man muss hier auch etwas von Mechanik, von der Chemie und nicht zuletzt von der Psychologie hinter dem Thema verstehen. Es ist sicherlich kein leichtes Unterfangen, hier eine Systematik zu finden und den Stoff so aufzubereiten, dass er exakt dargestellt wird, aber dennoch für den vorgebildeten Laien verständlich bleibt. Ob dieses Vorhaben gelungen ist, darüber können nur Sie als Leser eine Aussage treffen, nachdem Sie das Buch bis zur letzten Seite gelesen haben. Mir bleibt es, Wolfgang J. Tenbusch die notwendige Portion Glück zu wünschen, die man zur Erlangung dieses Zieles braucht.

Richard Small,  
Maidstone im Herbst 1988

## Zu diesem Buch

Der Autor hat sich der großen Aufgabe angenommen, nicht nur eine Zusammenfassung über den aktuellen Wissensstand in der Akustik und im Lautsprecherbau zu liefern, sondern sowohl den Kreis der wissenschaftlich Interessierten als auch den der Selbstbauer damit anzusprechen. So reicht die Thematik von den Grundlagen und Berechnungsformeln in den einzelnen Bereichen sowie den neuesten Detailinformationen bis hin zu Ratschlägen, denen man anmerkt, dass sie in der Praxis selbst erlebt worden sind. Der Fortgeschrittene findet hier ein in die Tiefe gehendes Wissen vor, das aber auch für den Anfänger so aufbereitet ist, dass dieser nicht gleich mutlos das Buch zur Seite legen muss.

Es ist aber nicht nur das unbedingt Notwendige, was Wolfgang Josef Tenbusch in die-sem Buch vermitteln will. Die praktische Beschäftigung mit dem Thema HiFi stellt eine der anspruchsvollsten und erfüllendsten Formen der Freizeitgestaltung dar, die es gibt. Wer sich dafür interessiert, der will einmal umfassend, in bestimmten Gebieten aber auch sehr eingehend und speziell informiert werden. So wird einerseits selbst dem Bereich der Wohnraumakustik und Saalbeschallung ein Kapitel gewidmet. Wer auf der anderen Seite zum ersten Mal eine Box selber bauen möchte, findet selbstverständlich entsprechende Informationen und im gesamten Buch wertvolle Hinweise und Hilfen. Der gesamte Themenkreis ist sicherlich zu umfangreich, um in allen Details in einem einzigen Buch abgehandelt zu werden. Alle wirklich wichtigen Stichwörter von Abstrahlverhalten bis Zubehör werden aber in diesem Buch in eingehender und dem heutigen Wissensstand entsprechender Weise behandelt.

Raymond E. Cooke,  
Maidstone im Winter 1988



Das Magazin für den Lautsprecher-Selbstbau seit 1986.

Alle bereits erschienenen Ausgaben und die kommenden Ausgaben können Sie herunterladen: [www.allyoucanread.de](http://www.allyoucanread.de)

## 2 Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Akustische Grundlagen</b>	<b>10</b>
3.1	Physikalische Akustik	10
3.1.1	Schall	10
3.1.2	Phase und Laufzeit	13
3.1.3	Beugung	14
3.1.4	Schwebung	15
3.1.5	Schalldruck	15
3.1.6	Strahlungswiderstand	16
	Fragen zu den allgemeinen Grundlagen der Akustik	18
3.2	Physiologische Akustik	19
3.2.1	Das Ohr	19
3.2.2	Isophonen	20
3.2.3	Ortung	25
3.2.4	Nebenwirkungen durch Beschallung	25
3.3	Psychologische Akustik	27
	Fragen zur Gehörphysiologie und -psychologie	29
<b>4</b>	<b>Dynamische Lautsprecher</b>	<b>30</b>
4.1.	Wirkungsweise	30
4.1.1	Antriebssystem	31
4.1.2	Membran	35
4.1.3	Membranmaterial	36
4.1.4	Membranverhalten	38
4.1.5	Resonanzfrequenz	40
4.1.6	Impedanzkurve	43
4.1.7	Temperaturverhalten	44
4.1.8	Wicklungsbreite	46
	Fragen zum allgemeinen Teil über Lautsprecher	46
4.2	Thiele-Small-Parameter	47
4.2.1	Äquivalenzvolumen	51
4.2.2	Wirkungsgrad	52
4.2.2.1	Lautsprecherentwicklung/Messung Software	53



4.3	Frequenzgang	59
4.4	Membrandurchmesser und Hub	60
	Fragen zu den Thiele-Small-Parametern	61
4.5	Partialschwingungen	62
4.6	Schallbündelung	65
4.7	Klirrfaktor	66
4.8.	Intermodulationsverzerrungen	67
4.9.	Impulsverhalten	68
4.10	Typenvielfalt	70
4.10.1	Konuslautsprecher	70
4.10.2	Kalottenlautsprecher	72
4.10.3	Flachmembranlautsprecher	78
	Fragen zur Typenvielfalt der Lautsprecher	83
4.10.4	Hornlautsprecher	83
	Fragen zum Hornlautsprecher	92
4.10.5	Akustiklinsen	93
4.10.5.1	Waveguide	94
4.10.6	Bändchenlautsprecher	96
4.10.7	Piezolautsprecher	98
4.10.8	Elektrostaten	99
4.10.9	Koaxiallautsprecher	100
4.10.10	Ionen-, Plasmalautsprecher	101
	Fragen zu alternativen Lautsprecherprinzipien	103
<b>5</b>	<b>Frequenzweichen</b>	<b>104</b>
5.1	Aufbau	105
5.2	Typologie und Wirkungsweise	106
5.3	Bauteile	108
5.3.1	Widerstände	109
5.3.2	Kondensatoren	111
5.3.3	Spulen	113
5.4	Berechnung von Frequenzweichen	115
5.4.1	Drei-Wege-Weichen, 1. – 4. Ordnung	116
5.4.2	Kompensationschaltungen	118
5.4.3	Filtertypen	119
5.4.3.1	Elektronische Weichen	120
5.4.4	D'Appolito	121

<b>6</b>	<b>Lautsprechergehäuse</b>	124
6.1	Gehäusematerialien und Resonanzen	125
6.2.	Schalldämpfung	130
6.3	Brechung an Gehäusen	134
6.4.	Boxentypologie	135
6.4.1	Geschlossene Gehäuse	135
6.4.2	Wirkungsweise und Berechnung	137
6.4.3	Wirkungsgrad	140
6.4.4	Variierende Parameter	141
6.5.	Bassreflex-System	142
6.5.1	Wirkungsweise und Berechnung	142
	Fragen zur Bassreflexbox	150
6.6	Transmission-Line	150
6.7	Exponential-Boxen	156
6.8	Sonderformen	159
6.8.1	Innentreiber (Compound)	159
6.8.2	Bandpass-Gehäuse	162
6.8.3	Filterunterstützte Boxen	164
6.8.4	Line Arrays	165
	Fragen zu den alternativen Boxentypologien	167
<b>7</b>	<b>Allgemeine Analysemethoden</b>	168
7.1	Akustische Systemanalyse mittels Fourier-Reihen	168
7.2	Messungen mittels Laser	173
<b>8</b>	<b>Hörbarkeit von Fehlern</b>	176
<b>9</b>	<b>Raumakustik</b>	178
9.1	Basswiedergabe	178
9.2	Stehende Wellen	180
9.3	Nachhall	181
9.4	Idealer Hörraum	185
9.5	Raumklangsysteme	190
<b>10</b>	<b>Handwerkskunde</b>	192
10.1	Fehlerquellen	198



## 3 Akustische Grundlagen

Wunder dauern etwas länger!

Diesem Motto getreu gibt es in der Akustik und im Lautsprecherbau wenige wirkliche Wunder. Um sich nicht von manchen mystizistischen Werbeversprechungen blenden zu lassen, ist es unumgänglich sich mit den physikalischen, physiologischen und sogar psychologischen Grundlagen der Akustik vertraut zu machen. In einem Buch über Lautsprecher kann dieses Kapitel natürlich nur angeschnitten werden und gehört zu jenen unzählbar vielen Randgebieten, die in das Grundthema dieses Buches hineinspielen. Es wäre sicherlich falsch zu behaupten, man käme ohne grundlegende Verständnisse der Akustik zu einer vollständigen Ansicht der Thematik. Nur spielen auch Elektrotechnik, Chemie, Metallurgie, Materialkunde und Mechanik so tragende Rollen im Lautsprecherbereich, dass eine wirklich vollständige Abhandlung der Grundlagen-Akustik vom technisch interessierten HiFi-Freund nicht ganz zu Unrecht als Ballast empfunden werden könnte.

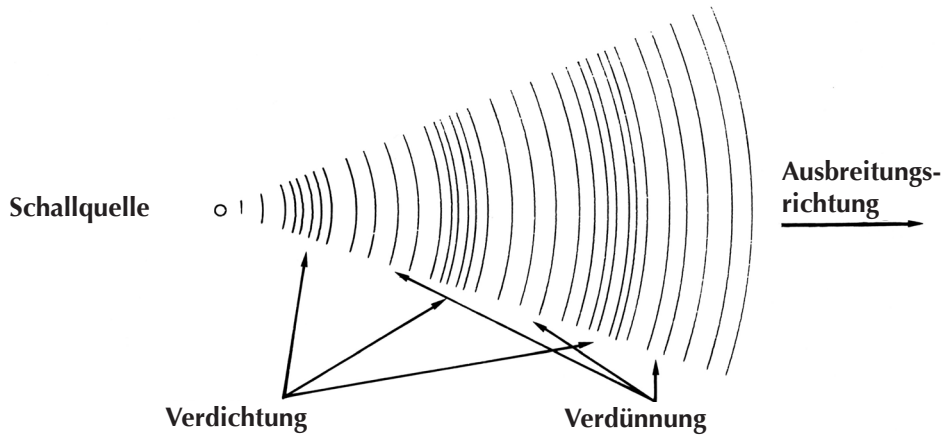
Die nun folgenden Seiten beschreiben deshalb in Kürze die wichtigsten Voraussetzungen, die zwischen dem Lautsprecher selbst und dem Ohr des Hörers gelten.

### 3.1 Physikalische Akustik

Bei der Physik geht es hauptsächlich um die Gesetzmäßigkeiten von Schwingungen. Viele Vorgänge in der Natur und in der Technik laufen periodisch, d.h. sich wiederholend ab. Denken wir an die Schwingungen eines Pendels oder die wellenförmige Ausbreitung der Aufprallenergie eines Steinwurfs auf einer planen Wasseroberfläche.

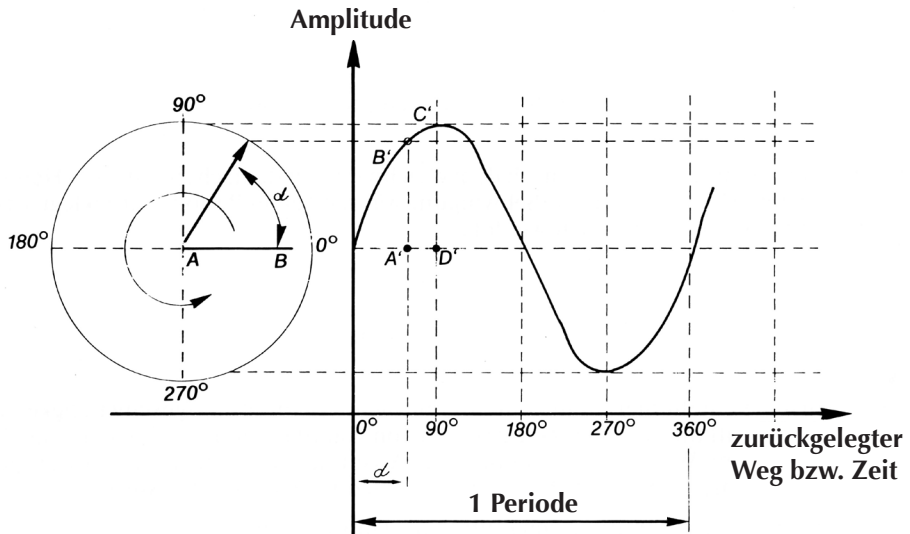
#### 3.1.1 Schall

Als Hörschall bezeichnen wir solche Schwingungen, die von unserem Ohr erfasst werden können. Wie kommt es nun zu diesen Schwingungen und wie erreichen sie unser Ohr? Nehmen wir eine Stimmgabel und schlagen sie an. Bei genauer Betrachtung werden wir feststellen, wie sich die Spitzen hin und her bewegen. Es entstehen Zonen unterschiedlichen Druckes, die sich wellenförmig ausbreiten und auf das Trommelfell treffen.



**Bild 1:** Periodische Luftverdichtungen und -verdünnungen

Versucht man jetzt, solche Schwingungen grafisch zu erfassen und auch die Faktoren Zeit und Intensität zu berücksichtigen, entsteht ein Bild, das der bekannten Sinus-Schwingung nicht unähnlich ist. Mathematisch gesehen ist der Sinus die Projektion des rotierenden Zeigers AB auf die Y-Achse in Bezug zur Winkelfunktion im gleichschenkeligen Dreieck.



**Bild 2:** Sinus-Funktion



Die Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen ausbreiten, ist von dem Medium abhängig, in dem sie sich fortbewegen. Die Frequenz selbst hat keinen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Je fester die Atomstruktur, also der innere Zusammenhang, desto schneller die Ausbreitung. Von wesentlicher Bedeutung ist vor allem die Temperatur des übertragenden Mediums. Allgemein gilt: je höher die Temperatur, desto größer die Schallgeschwindigkeit. In Gasen und Flüssigkeiten können keine Schubspannungen auftreten, daher liegt die Ausbreitungsrichtung immer parallel zur Schwingungsrichtung. Die Ausbreitung in festen Körpern ist im Gegensatz dazu vielfältig. Betrachten wir dazu die Fortbewegungsgeschwindigkeiten in einigen ausgewählten Materialien:

Medium	Temperatur	Geschwindigkeit
Helium	0° Celsius	971 m/s
Wasserstoff	0° Celsius	1286 m/s
Luft	0° Celsius	331,8 m/s
Luft	+20° Celsius	343,8 m/s
Luft	+800° Celsius	658 m/s
Wasser	0° Celsius	1440 m/s
Eisen	0° Celsius	5000 m/s

Ebenfalls häufig verwendete Begriffe in der Akustik sind die Frequenz und die Wellenlänge. Erinnern wir uns an die Abbildung der Sinus-Funktion, in der eine Periode einer vollständigen Schwingung entspricht. Misst man jetzt, wie viele Perioden auf eine Sekunde kommen, ergibt sich daraus die Frequenz:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Hz (Schwingungen pro Sekunde)}$$

Die Einheit für die Frequenz ist nach dem gleichnamigen deutschen Physiker Heinrich Hertz benannt. Der Weg, den eine Schwingung während einer Periode zurücklegt, ist die Wellenlänge. Sie berechnet sich wie folgt:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda (= \text{sprich: Lambda})$$

Der Buchstabe  $c$  steht hier für die durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in der Luft bei 20 Grad Celsius mit ca. 334 m/s. Für einen Ton von 10 Hz ergibt sich somit eine Wellenlänge von 33 m. Wie bereits bekannt, ist die Ausbreitung in den einzelnen Transportmedien unterschiedlich, die Wellenlänge also auch kein konstanter Wert.

Betrachten wir die Ausbreitung von Luftschall, dann sehen wir zwei grundverschiedene

Phänomene: Einerseits die Zusammenziehung und Ausdehnung aufeinanderfolgender „Lufttaschen“ und andererseits die Schwingungen der Moleküle selbst um ihre Ruhelage. Diese Schwingung wird Schnelle bzw. Teilchenbeschleunigung genannt und ist vergleichbar mit der Bewegung eines Pendels. Jeweils im Nulldurchgang der Sinusfunktion schwenkt das gedachte Pendel um und bewegt sich wieder in die andere Richtung. Genau in diesem Punkt erreicht das Teilchen nun seine Extremposition, wobei die Schnelle in diesem Moment gleich null ist.

Schnelle und Druckveränderung bedingen einander und ergeben erst in ihrem Zusammenwirken den Schall. Wichtig ist hier nur die Erkenntnis, dass kein Transport von Luftteilchen stattfindet, sondern lediglich ein fortgesetztes Anstoßen der Luftmoleküle zwischen Schallquelle und Hörer.

### 3.1.2 Phase und Laufzeit

Da sich die Schallwelle mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet, erreicht sie verschiedene Hörplätze natürlich auch zu verschiedenen Zeiten. Dieser zeitliche Unterschied ist auch zwischen den beiden Ohren eines Hörers von Bedeutung und wird als Laufzeit-Differenz bezeichnet:

$$t = \frac{d}{c} \quad \text{in Sekunden}$$

Dabei gibt  $d$  die Distanz zwischen den beiden Hörplätzen an. Beträgt die Distanz beispielsweise 20 cm, dann ergibt sich eine Laufzeitdifferenz von ca. 0,58 Millisekunden. Dieser Unterschied ist selbstverständlich konstant über die Frequenz; im HiFi-Bereich wird allerdings recht oft der Begriff der Phasenverschiebung herangezogen, um auf die hierdurch entstehenden Probleme und Phänomene hinzuweisen. Der Begriff der Phasenlage ist hier nur dann von Bedeutung, wenn entweder zwei Schallwellen einen Hörplatz erreichen oder eine Schallwelle zwei räumlich auseinanderliegende Hörplätze passiert. Multipliziert man die Laufzeitdifferenz  $t$  mit der Frequenz der Schallwelle und der Anzahl der Gradabschnitte eines Kreises (ist gleich 360), dann erhält man die Phasenverschiebung der beiden Signale:

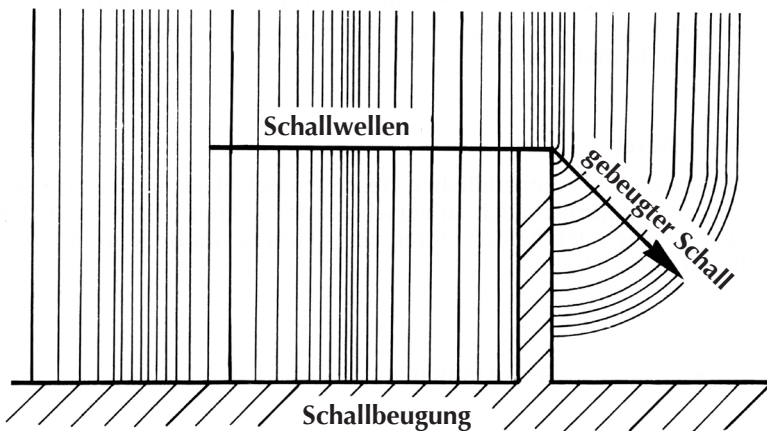
$$\text{Phasendifferenz} = t \cdot f \cdot 360 \quad \text{in Grad}$$

Aus unserem oben angesprochenen Beispiel ergibt sich bei einer Distanz von  $d = 20$  cm und einer Frequenz von 1000 Hz eine Phasendifferenz von ca. 209 Grad.



### 3.1.3 Beugung

Trifft die Schallwelle auf ein Hindernis, so sind die Auswirkungen von dem Verhältnis Wellenlänge zu Hindernis abhängig. Tiefe Frequenzen haben die Eigenschaft, sich um Gegenstände, die sich ihnen in den Weg stellen, zu beugen, d.h. auf der anderen Seite kann der Ton mit der gleichen Lautstärke gehört werden. Anders ist es mit hohen Frequenzen, dort entsteht ein Schallschatten und die Schwingung ist an dieser Stelle gar nicht oder nur sehr leise wahrnehmbar. Deshalb muss bei der Wiedergabe von hohen Tönen meist eine direkte Beschallung des Empfängers erfolgen.



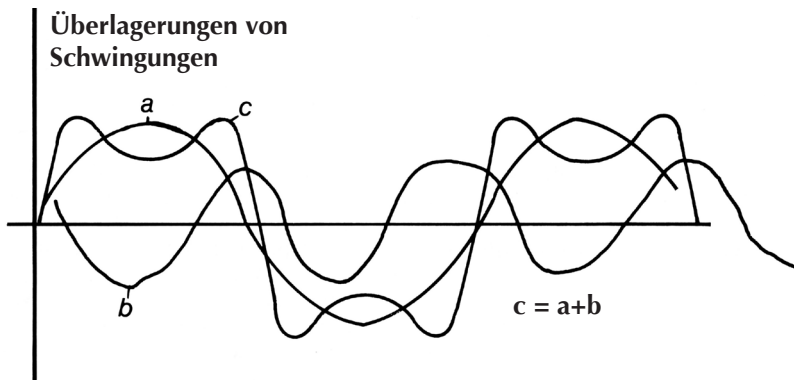
**Bild 3:** Schallbeugung bei tiefen Frequenzen

Die am Anfang besprochenen Sinus-Schwingungen kommen in der Natur nicht vor. Der Klang eines Instrumentes setzt sich aus einem Grundton und beliebig vielen Obertönen zusammen. Der Mathematiker J.B. Fourier entdeckte, dass jede periodische Schwingung sich als Überlagerung endlich vieler Sinus-Schwingungen darstellen lässt. Diese Obertöne entstehen jeweils als ein ganzzahlig Vielfaches des Grundtones.

#### **Beispiel:**

- Grundton = 440 Hz
- 1. Oberton = 880 Hz
- 2. Oberton = 1760 Hz

Je mehr Obertöne vorhanden sind, desto heller empfinden wir den Klang; z.B. bei der Oboe, während die Flöte als obertonarmes Instrument eher matt klingt. Hat man jedoch eine Vielzahl von Frequenzen, die sich nicht mehr voneinander trennen lassen, so spricht man von einem Geräusch. Die resultierende Schwingung ergibt sich aus der mathematischen Addition der Amplitudenwerte.



**Bild 4:** Schwingungsüberlagerung

Bei der Überlagerung von Schwingungen, Interferenz genannt, kann es auch zur Auslöschung kommen, d.h. die entsprechende Frequenz verschwindet ganz. Ein Phänomen, mit dem wir uns in den folgenden Absätzen noch des Öfteren beschäftigen werden.

### 3.1.4 Schwebung

Treffen zwei Schwingungen mit nur geringem Frequenzunterschied aufeinander, hat der Zuhörer das Empfinden einer an- und abschwellenden Lautstärke. Dies wird in der Musikwissenschaft als Schwebung bezeichnet. Solch eine Schwebung kann z.B. auftreten, wenn zwei gleiche Instrumente nicht exakt aufeinander abgestimmt sind.

### 3.1.5 Schalldruck

Um die physikalische Stärke eines Schallvorganges beschreiben zu können, gibt man den Wert des Schalldruckes in dB (Dezibel) an. Der Schalldruck gibt das Maß der sich zeitlich und örtlich ändernden Druckschwankungen in Relation zum Ruhedruck an. Die Angabe in der nach dem amerikanischen Physiker G. Bell benannten Einheit erfolgt deshalb, weil eine lineare Messung der Druckveränderungen sich nicht direkt auf die Lautheitsempfindung des Ohres beziehen lässt. Die Einheit Dezibel logarithmiert die Verhältniszahlen und setzt sie dadurch in den hörphysiologischen Empfindungen besser entsprechende Werte um. Der Schalldruckpegel nach DIN 45630 ergibt sich also zu

$$L = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{in dB}$$





Dieser Wert wird in der neueren Akustik oft auch als Spannungsschalldruck beschrieben, da sich, analog der elektrischen Spannung an einem Widerstand, der akustische Schalldruck als Spannung darstellt. Diesen Spannungsschalldruck findet man als Angabe des „Kennschalldrucks“ oder genauso fälschlich „Wirkungsgrad“ in Lautsprecherkatalogen.

Eine Verdopplung des Schalldrucks entspricht einem Zuwachs von 6 dB. Mit der Entfernung vom Entstehungsort der Schallwelle nimmt der Schalldruck umgekehrt proportional zur Entfernung ab. Mit jeder Verdopplung der Entfernung verringert sich also der wahrnehmbare Schalldruck um 6 dB. Von einem Lautsprecher, der gemessen in einem Meter Entfernung einen Schalldruck von 90 dB bei einem Watt Eingangsleistung produziert, messen wir bei Aufstellung des Messgerätes in einer Entfernung von zwei Metern also nur noch 84 dB bei gleicher Eingangsleistung. Wie viel Leistung ist aber notwendig, um auf der größeren Entfernung wieder den gleichen Schalldruck wie bei einem Meter zu erhalten?

Jede Verdopplung der zugeführten Eingangsleistung bewirkt eine Erhöhung des Schalldrucks um 3 dB. Folglich müssen wir dem Lautsprecher  $2 \cdot 2 = 4$  Watt, also vier Watt zukommen lassen, um einen Schalldruck von 96 dB in einem Meter und damit von 90 dB in zwei Metern Entfernung zu erhalten.

Die Verwendung der Maßeinheit dB erlaubt also, durch simple Additionen von glatten Zahlen einen Überblick über das mögliche Lautstärkeverhalten am Hörplatz zu erhalten.

### 3.1.6 Strahlungswiderstand

Wenn sich die Welle in der Luft oder in einem anderen Medium ausbreitet, dann trifft sie auf einen Widerstand, der in der Akustik als Strahlungswiderstand bezeichnet wird. Dieser Widerstand verhält sich zur akustischen Welle wie ein elektrischer Verbraucher zu einer elektrischen Wechselspannung aus dem Stromnetz. Der Strahlungswiderstand der Luft beträgt konstant 420 Ohm pro Quadratmeter. Die effektive Schallleistung, die eine Schallquelle an die Luft abgeben kann, hängt also davon ab, wie gut sie an den Strahlungswiderstand der Luft angepasst ist. Die Verhältnisse sind zu vergleichen mit denen einer Übertragungsleitung in der HF-Technik. Wer einmal eine Fernsehantenne selbst verlegt hat, weiß, dass die Übertragungsstrecke des Antennenkabels nur dann optimal funktioniert, wenn der Ausgangs-Wellenwiderstand der Antenne gleich dem Wellenwiderstand des Kabels und gleich dem Eingangs-Wellenwiderstand des Empfängers ist. Ist beispielsweise der Wellenwiderstand des Kabels zu hoch gewählt, dann kommt es im Kabel zu Reflexionen der Hochfrequenz, die sich in „Geisterbildern“ und ähnlichen Phänomenen äußern.

Genauso verhält es sich mit dem Lautsprecher oder anderen Schallerzeugern und der Umgebungsluft: Ein optimales Funktionieren der Schallübertragung ist nur gewährleistet, wenn die mechanische Impedanz des Lautsprechers annähernd gleich dem

Strahlungswiderstand der Luft ist. Dazu wäre Voraussetzung, dass der Umfang der Membran zumindest genauso groß ist wie die längste abzustrahlende Wellenlänge. Wie groß akustische Wellen bei tiefen Frequenzen werden, haben wir weiter oben schon besprochen. Es bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung, dass die allgemein in Boxen verwendeten Membrangrößen verhältnismäßig klein sind gegenüber den akustischen Wellen. Ein großer Teil der vom Lautsprecher abgestrahlten Leistung wird also reflektiert und steht nicht mehr als Schallleistung am Hörort zur Verfügung.

Der Schalldruck bezeichnet die Kraft des Schalls über eine Fläche. Die Schallleistung definiert sich dementsprechend als der Energiedurchfluss durch eine bestimmte Fläche und entspricht dem Quadrat des Schalldrucks dividiert durch das Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte der Luft.

Befindet sich ein Lautsprecher frei im Raum, dann strahlt er bei tiefen Frequenzen kugelförmig ab. Bei höheren Frequenzen, wenn der Umfang des Schallerzeugers so groß wird wie oder größer als die Wellenlänge, erfolgt dagegen eine gerichtete Abstrahlung. Steht der gleiche Lautsprecher auf dem Boden, dann kann sich der Schall nur nach oben fortpflanzen und der Lautsprecher muss tiefe Töne nur noch halbkugelförmig abstrahlen. Da sich damit die zu beschallende Fläche halbiert, muss der Lautsprecher auch nur noch die halbe Schallleistung abstrahlen. Damit erhöht sich der Schalldruck im Bereich jener Wellenlängen, die größer sind als der Schallerzeuger, um 3 dB. Das Gleiche gilt für jede weitere Begrenzungsfläche, da sich mit jeder hinzutretenden Fläche das Schallfeld, in das der Lautsprecher strahlen muss, halbiert.

Die heutige Lautsprechertheorie geht in der Regel von einem halbkugelförmigen Abstrahlverhalten aus. Die in vergangenen Tagen von verschiedenen Herstellern empfohlene Aufstellung eines Lautsprechers für maximalen Schalldruckgewinn im Bassbereich sollte bei heutigen Lautsprechern nicht mehr durchgeführt werden, da diese in ihrem Gesamtverhalten auf die akustischen Gegebenheiten moderner Wohnsituationen abgestimmt wurden. War noch in den 60er-Jahren eine untere Frequenzgrenze von ca. 50 Hz erstrebenswert, so fordern die heutigen Tonträger schon eine weitere Bassoktave. Wer meint, er habe einen zu kleinen Raum, um Töne unterhalb 50 Hz hörbar zu machen, der liegt wahrscheinlich einem weit verbreiteten Irrtum auf. Innerhalb kleiner Räume kommt es zwar nicht mehr zur Ausbildung voller Wellenzüge bei niedrigen Frequenzen, sie wirken aber als Druckkammer, und für das Erlebnis wirklich tiefer Phänomene reicht diese Tatsache aus. Wir brauchen hier nur an den im Bassbereich erstaunlich ausgedehnten Frequenzgang guter Kopfhörer zu denken, ähnliche Verhältnisse findet der Lautsprecher in kleinen Räumen vor. Man benötigt übrigens auch keine Riesenlautsprecher, um auf diese Weise in kleinen Räumen tiefe Töne hörbar zu machen. Je kleiner der Raum, desto geringer ist der Bedarf an großen Lautsprechern, da auch ein kleiner Langhubbass in der durch die Raumgeometrie gegebenen kurzen Hördistanz die notwendigen Druckzyklen erzeugen kann. Problematischer sind da schon spärlich möblierte Wohnzimmer von mehr als 40 Quadratmetern Fläche. Hier kann es eher zu ausgeprägten Resonanzen, Reflexionen und Echos kommen, die jede gute HiFi-Wiedergabe zunichtemachen.



## Fragen zu den allgemeinen Grundlagen der Akustik:

1. Wie hoch ist die Schallgeschwindigkeit in der Luft?
  - a um 340 Meter pro Sekunde
  - b um 1200 Meter pro Sekunde
  - c um 11 Meter pro Sekunde
  
2. Welche Wellenlänge hat ein Ton von 35 Hertz in der Luft?
  - a etwa 4,86 Meter
  - b etwa 9,72 Meter
  - c etwa 100 Meter
  
3. Der Schall breitet sich in Gasen ...
  - a nicht aus
  - b strahlenförmig aus
  - c sinusförmig aus
  
4. Auf einer Schallwand strahlen zwei Lautsprecher beide einen Ton von 2000 Hertz ab. Lautsprecher A sitzt um fünf Zentimeter nach hinten gegenüber Lautsprecher B versetzt. Wie hoch ist der Phasenunterschied zwischen den beiden abgestrahlten Schallwellen?
  - a 360 Grad
  - b 172,45 Grad
  - c 104,95 Grad
  
5. Sie sitzen mit einem Schallpegel-Messgerät sechs Meter vor einem Lautsprecher bei einem Rockkonzert. Das Gerät zeigt einen Pegel von 110 dB an. Was wird es in zwölf Metern Entfernung anzeigen?
  - a 107 dB
  - b 116dB
  - c 104 dB

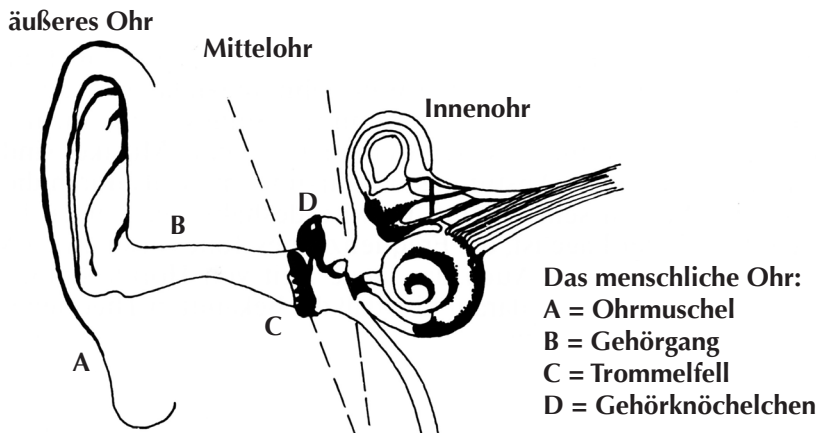
*Richtige Antworten: 1a 2b 3c 4c 5c*

## 3.2 Physiologische Akustik

Das menschliche Hörempfinden ist keine lineare Funktion, sondern hat eine hohe Komplexität, deren Erklärungsansätze sich in den Bereichen Physik, Physiologie, Anatomie und Psychologie befinden und somit einer gesonderten Erläuterung bedürfen. Der Hörapparat und seine biologische Funktion sind trotz allem nur zu einem gewissen Teil erforscht. Kenntnisse dieses Themenkreises sind aber schon deshalb unerlässlich, um die Grenzen des möglichen oder sinnvollen Aufwandes bei der Lautsprecher-Wiedergabe verstehen zu können.

### 3.2.1 Das Ohr

Das Ohr untergliedert sich in drei Funktionsabschnitte: Außen-, Mittel- und Innenohr.



**Bild 5:** Aufbau des Ohres

Das Außenohr reicht von der Ohrmuschel über den Gehörgang zum Trommelfell, die Aufgabe besteht in der Schallaufnahme und Weiterleitung. Aufgrund der rein physikalischen Abmessungen der Ohrmuschel werden Frequenzen um die 3 kHz besonders empfindlich wahrgenommen.

Das Mittelohr dient als Kupplung zwischen Druckschwankungen und Nervensystem. Direkt am Trommelfell angewachsen ist der Hammer, der über Amboss und Steigbügel die Bewegung der Membran weitergibt. Diese drei Knöchelchen sind elastisch und haben eine Schutzfunktion bei sehr hohen Schalldrücken. Dadurch bedingt ist die Umsetzung vom Außen- zum Innenohr nicht linear.

Der Steigbügel bewegt die das Innenohr abschließende Membran, an die sich ein mit



Lymphflüssigkeit gefülltes Kanalsystem anschließt, das den Schall über die Schnecke an die Basilarmembran weiterleitet. Je nach Frequenz werden ganz bestimmte Teile der Membran und die mit ihr verbundenen Gehörnerven angeregt. Davon stehen etwa 25.000 zur Verfügung, die uns ermöglichen, ca. 3000 Tonabstufungen zu unterscheiden.

Der Druckausgleich zwischen Mittel- und Innenohr findet mithilfe der Eustachischen Röhre statt, die im Gaumen endet und sich beim Schlucken öffnet. Jeder, der schon einmal Fahrstuhl gefahren ist, kennt dieses Erlebnis der Druckentlastung.

In Diskussionen und Abhandlungen jüngerer Datums deutet sich an, dass die Entwicklungsgeschichte eines Sinnesorgans nicht unbedingt isoliert betrachtet werden darf, da alle diese Organe von der Evolution umgeformte und spezialisierte Teile des Gehirns darstellen. Sicher ist inzwischen, dass man auch mit Teilen beispielsweise der Hautoberfläche oder der Schädelknochen akustische Wahrnehmungen tätigen kann, andererseits können die biologischen Teile eines bestimmten Sinnesorgans nicht als einer Funktion ausschließlich zugeordnet gesehen werden. Geschulte Musiker sind etwa in der Lage, wesentlich mehr tonale Abstufungen wahrzunehmen, als durch die Anzahl der Hörnerven vorgegeben zu sein scheint. Es wird deshalb von einigen Forschern untersucht, ob das Ohr in der Lage ist, die Frequenz eines Tones etwa durch Messung der Periodenlänge zu bestimmen. Auch das lange Zeit von Hörphysiologen gerne bestrittene „absolute Gehör“ deutet darauf hin, dass es sich hier um ein komplexes neurales System jenseits der rein physikalischen Messwerte handelt.

### 3.2.2 Isophonen

Die DIN 1320 drückt den vom Ohr wahrnehmbaren Hörschall aus. Er liegt im Bereich von 16 Hz – 16 kHz, dies ist ein Mittelwert, der von Mensch zu Mensch unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Die Fähigkeit hohe Frequenzen zu hören, nimmt mit dem Alter ab. Dies ist für die Informationsübermittlung jedoch nicht von Bedeutung, da hierfür die Bereiche unterhalb 10 kHz benutzt werden. Für die reine Sprachübermittlung brauchen wir sogar nur die Frequenzen unterhalb 5 kHz.

Um die unerhörte Leistungsfähigkeit des Ohres zu verdeutlichen, sind noch einige physikalische Werte notwendig.

Luftdruckschwankungen geben wir in Bar und Pascal an:

$$1 \text{ Bar} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$