

Hallo, Echo!

Schall: Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption

Schall besteht seiner Natur nach aus mechanischen Schwingungen in elastischen Medien. Das Auftreten von Schall ist somit an die Existenz von Materie gebunden. Im Vakuum gibt es keinen Schall. Mit anderen Worten: Schall kann in gasförmigen (Luftschall), in flüssigen (Flüssigkeitsschall) und/oder in festen Stoffen (Körperschall) auftreten.

Im ersten Beitrag dieser Reihe wurde neben allgemeinen Grundlagen im Wesentlichen die Abstrahlung von Schall in unbegrenzten Räumen, d. h. im Freien,

vorge stellt und behandelt. Tatsächlich aber finden sehr viele Schallabstrahlungen in mehr oder weniger geschlossenen Räumen statt, also dort, wo die Schallausbreitung von den Eigenschaften der Raumbegrenzungen sowie anderen Hindernissen bestimmt wird. In solchen Fällen kommt es nicht mehr zur Ausbildung eines freien Schallfeldes, sondern eines mehr oder weniger diffusen Schallfeldes, in dem andere Gesetze gelten. So gilt dort beispielsweise nicht mehr das $1/r$ -Gesetz, wonach der Schalldruck p um die Hälfte und der Schalldruckpegel L_p um 6 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt.

Um die Verhältnisse in einem diffusen Schallfeld zu verstehen, müssen wir uns zunächst mit Begriffen wie Schallreflexion, -beugung, -brechung und -absorption befassen. Dazu gehören u. a. Kenngrößen wie beispielsweise der Reflexionsfaktor r , der Absorptionsgrad α und die Nachhallzeit T .

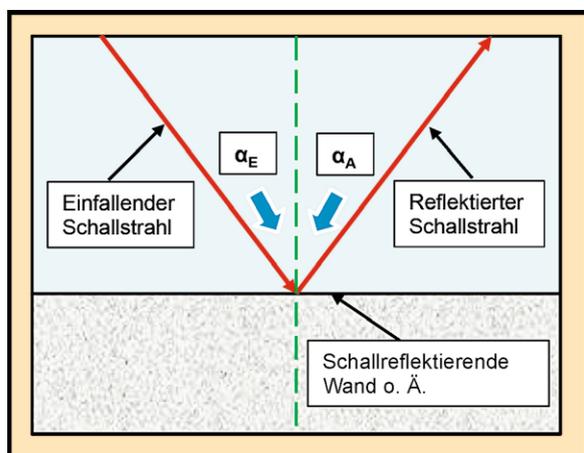


Bild 1: Reflexion von Schallstrahlen (stellvertretend für Schallwellen) an einer hart reflektierenden Fläche (Wand, Platte, o. Ä. flaches Hindernis):

α_E = Einfallswinkel des Schallstrahls

α_A = Winkel des reflektierten Schallstrahls

Beide Winkel sind gleich.

Entfernung r von der Quelle (in: m)	Schalldruck p ($\sim 1/r$) (in: Pa)	Schalldruckpegel L_p (in: dB)
0,5	z.B.: 0,2	80
1,0	0,1	74
2,0	0,05	68
4,0	0,025	62
8,0	0,0125	56

Veranschaulichung des Abstandsgesetzes ($1/r$ -Gesetz) anhand eines Zahlenbeispiels



Zur Information:

In leicht verständlicher Form wollen wir in den kommenden Ausgaben eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik** vermitteln.

Diese Themengebiete werden wir beleuchten:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren
- **Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption**
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler
- Raum- und Bauakustik – sabinesches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Messboxen und Hallräume
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infrarotschall – natürliche und industrielle Quellen

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

Schallreflexion

Trifft eine fortschreitende Schallwelle auf eine „schallharte“ Wand, so wird sie von dort reflektiert. Das ist ein ähnlicher Vorgang wie bei der Reflexion eines Lichtstrahls, der auf einen Spiegel fällt. Zur besseren Veranschaulichung einer Schallreflexion ist es hilfreich, sich die Ausbreitung von Schall durch „Schallstrahlen“ vorzustellen. Das ist überall dort statthaft, wo die Abmessungen eines Raumes groß sind im Vergleich zur Wellenlänge λ . Fällt ein ganzes Bündel von Schallstrahlen auf eine schallharte Wand, so wird jeder einzelne Schallstrahl daran so reflektiert, dass der Einfallswinkel α_E gleich dem Ausfallswinkel α_A ist, siehe [Bild 1](#).

Der Begriff der „schallharten Wand“ verlangt in diesem Zusammenhang nach Erklärung. Im ersten Beitrag dieser Serie (siehe ELV Journal 2/2019) war bereits die Rede von Impedanzen. Für die Schallkennimpedanz $Z_o (= p/v)$ von Luft wurde dort bereits ein Wert von 408 Ns/m^3 genannt. Trifft eine ebene, sich in Luft ausbreitende Schallwelle auf eine Wand, so setzt diese der einfallenden Welle einen Widerstand mit einer bestimmten Impedanz Z_s entgegen. Ist diese Impedanz sehr viel größer als Z_o , und das ist bei massiven Wänden stets der Fall, so wird die einfallende Schallwelle von dieser nahezu vollständig reflektiert (Totalreflexion). Die dabei reflektierte oder zurücklaufende Schallwelle überlagert sich mit der einfallenden oder hinlaufenden Schallwelle.

Bei senkrechtem Schalleinfall entsteht dabei eine sogenannte stehende Welle, englisch: standing wave, mit ausgeprägten Schalldruckmaxima und -minima. Dieser Effekt findet eine wichtige Anwendung in der akustischen Messtechnik, z. B. bei der Bestimmung der Absorptionseigenschaften von Schallschluckmaterial in einem Impedanzmessrohr, siehe [Bild 2](#). Dabei geht es um ein Rohr, dessen Wandmaterial nicht mitschwingt, und in dem Rohrwellen erzeugt werden. Es handelt sich dabei in sehr guter Näherung um ebene Schallwellen. Mit der Schallausbreitung in Rohren hat sich bereits im Jahre 1866 A. Kundt beschäftigt, und zwar zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. In Erinnerung geblieben ist das nach ihm benannte kundtsche Rohr.

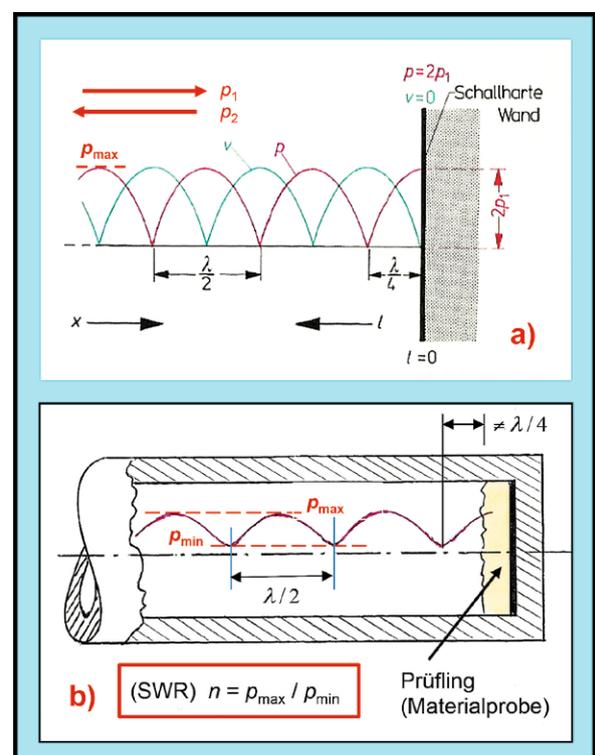


Bild 2: Ausbildung von stehenden Wellen vor schallharten Wänden und in Rohren.

a) Räumliche Verteilung von Schalldruck p und Schallschnelle v bei totaler Schallreflexion an einer schallharten Wand. Darin sind p_1 der Schalldruck der hinlaufenden Welle und p_2 der Schalldruck der reflektierten Welle.

b) Ausbildung einer stehenden Welle in einem dickwandigen Rohr, das mit einer Materialprobe vor schallhartem Rohrende abgeschlossen ist. Aus dem darin messbaren Stehwellenverhältnis n kann man den Reflexionsfaktor $r = (n - 1)/(n + 1)$ und somit auch den Absorptionsgrad $a = 1 - r^2$ bestimmen.

Bestimmung des Schallabsorptionsgrades

Heute werden Impedanzmessrohre zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades α ($= I_{\text{absorb.}}/I_{\text{einfall.}}$) und der frequenzabhängigen Impedanz von schallabsorbierenden Materialien eingesetzt. Das Messprinzip nutzt, wie schon erwähnt, die Ausbildung einer stehenden Schallwelle mit ortsfesten Schalldruckmaxima p_{max} und Schalldruckminima p_{min} aus, und zwar als Folge einer Schallreflexion am Rohrende. Je nachdem wie das Rohr abgeschlossen ist (schallhart oder mit einer komplexen Impedanz, z. B. mit einem porösem Fasermaterial), kann das Stehwellen-Verhältnis $n = p_{\text{max}}/p_{\text{min}}$ (englisch: standing wave ratio oder SWR) sehr unterschiedliche Werte annehmen. Bei schallhartem Abschluss findet man das letzte Minimum in einem Abstand von genau $\lambda/4$ vor dem Rohrende, siehe Bild 2a). Bei Abschluss mit einer komplexen Impedanz ist der Abstand des letzten Minimums von der Oberfläche der Materialprobe $\neq \lambda/4$, siehe Bild 2b).

Anfangs wurde der Verlauf der stehenden Welle mithilfe eines innerhalb des Messrohres beweglichen Sondenmikrofons ausgemessen, und zwar in Abhängigkeit von der Frequenz, siehe Bild 3a). Der Lautsprecher-

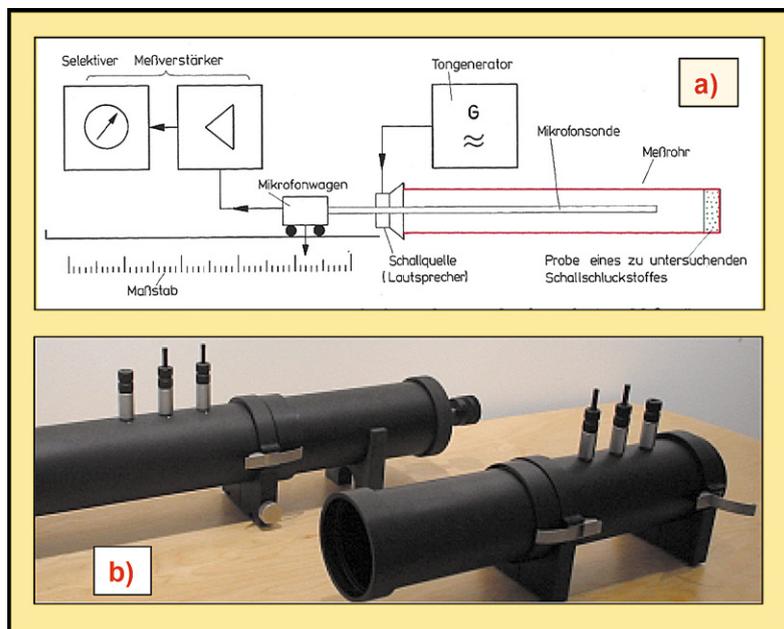


Bild 3: Impedanzmessrohr

a) Prinzipieller Aufbau eines Impedanzmessrohrplatzes früherer Ausführung (kundsches Rohr) mit beweglichem Sondenmikrofon und dazugehörigen Messgeräten
b) Neuere Ausführung von Impedanzmessrohren mit zwei feststehenden Mikrofonen und wählbaren Abständen zwischen beiden

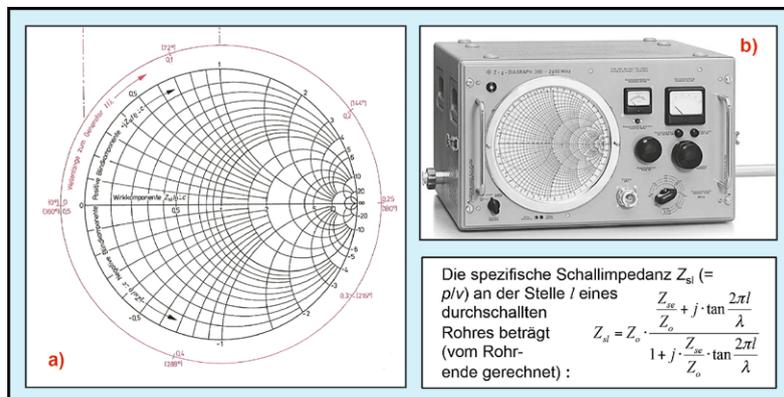


Bild 4: Impedanzverhältnisse entlang von hochfrequenten elektrischen Leitungen bzw. in niederfrequenten akustischen Rohrleitungen:

a) Smith-Diagramm zur Bestimmung der spezifischen Schallimpedanz in Rohrleitungen. Darin sind Z_o die Schallkennimpedanz ($= \rho \cdot c$) und Z_{se} die spezifische Abschlussimpedanz einer Rohrleitung.

b) Z-g-Diagramm von Rohde & Schwarz. Das war das erste Messgerät, das vor über 80 Jahren (!) zur Messung der genannten Impedanzen entstand, anfangs für einen Frequenzbereich von 30–300 MHz, später sogar bis 2400 MHz.

kern war dabei meist durchbohrt, um die Einführung der verschiebbaren Messsonde zu ermöglichen. Das Ende des Rohres war mit der zu messenden Materialprobe abgeschlossen. Dieses Verfahren erfordert einen vergleichsweise großen Zeitaufwand und außerdem ein recht langes Rohr, insbesondere dann, wenn der Messfrequenzbereich bis zu 30 Hz hinab ausgedehnt werden soll. Inzwischen gibt es neuere Verfahren, z. B. über die Impedanzmessung mithilfe eines kürzeren Rohres und eines feststehenden Mikrofonpaares, Bild 3b). Von den durch die beiden Mikrofone aufgenommenen Signalen wird mithilfe eines Spektrumanalysators eine Transferfunktion gebildet und daraus letztlich der Reflexionsfaktor $r = p_{\text{refl.}}/p_{\text{einfall.}}$ berechnet. Die akustische Anregung erfolgt bei diesem Verfahren mit weißem Rauschen.

Analogie zur Elektrotechnik

Ergänzend zum Thema Schallausbreitung in Rohrleitungen, die mit einer definierten Impedanz abgeschlossen sind, sei hier noch auf eine Analogie zur elektrischen Leitungstheorie hingewiesen. Die Impedanz – elektrisch wie akustisch – ändert sich entlang von Leitungen gemäß einer trigonometrischen Tangensfunktion. Die rechnerische Behandlung dieses Verhaltens ist im Allgemeinen etwas aufwendig. Daher hat man die in der Elektrotechnik, bzw. in der Hochfrequenztechnik, bewährte Behandlung dieses Themas auch für vergleichbare Vorgänge in der Akustik übernommen. Die umständliche und zeitraubende Rechenarbeit hat man später durch Verwendung eines sehr praktischen Diagramms ersetzt. Es handelt sich dabei um das in der Nachrichtentechnik gut bekannte Smith-Diagramm, in dem man relative Impedanzen mit Werten zwischen 0 und $\pm \infty$ eintragen und damit arbeiten kann, ein bemerkenswertes Hilfsmittel (siehe Bild 4a). Vor über einem halben Jahrhundert hat die Münchner Firma Rohde & Schwarz sogar ein Messgerät (Bild 4b) dafür entwickelt und auf den Markt gebracht. Das arbeitete damals schon in einem Frequenzbereich von 30 bis 300 MHz und später sogar bis zu 2400 MHz. Eine ausführliche Behandlung dieser gesamten Thematik findet man in der einschlägigen Fachliteratur.

Mit Schallbeugung „um die Ecke hören“

Auch bei der Schallbeugung gibt es viele Parallelen zur Optik. Aus der Optik ist bekannt, dass jeder lichtundurchlässige Gegenstand, der sich im Strahlengang von Licht befindet, einen seinen Umrissen entsprechenden Schatten wirft oder dass jede Blende in einer lichtundurchlässigen Wand nur einen solchen Lichtstrahl hindurchlässt, der genau der Form der Blendenöffnung entspricht. Diese Art der Schattenwirkung trifft bei Schallwellen nicht immer zu. Hindernisse oder Blenden, die man dem Licht entgegenstellt, sind allgemein sehr viel größer als die Wellenlängen des Lichts. In der Akustik ist das anders. Einem Frequenzbereich von beispielsweise 100 Hz bis 10 kHz entspricht in Luft ein Wellenlängenbereich von etwa 3 m bis 3 cm. Das ist aber genau der Größenordnungsbereich, in dem die Abmessungen der meisten Gegenstände unserer Umgebung liegen.

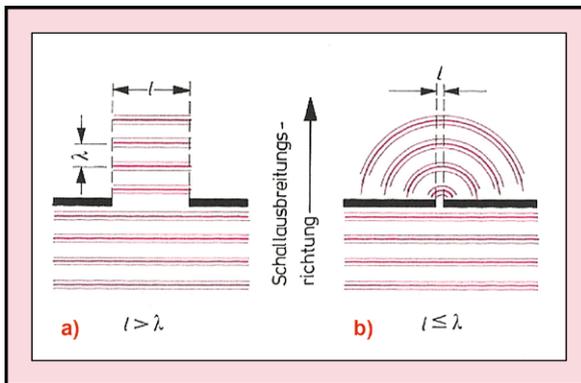


Bild 5: Beugung von ebenen Schallwellen, die durch eine Blende hindurchtreten. Gezeichnet: Geometrische Strahlengrenzen.
 a) Ein ebenes Wellenbündel läuft gegen eine Wand mit einer Öffnung (Blende), die breiter ist als die Schallwellenlänge λ . Durch die Blende tritt ein recht genau umrissener Schallstrahl hindurch.
 b) Ist die Breite der Öffnung genauso groß oder sogar noch kleiner als die Wellenlänge λ , so erfährt das primär hindurchtretende Wellenbündel eine sehr starke Beugung nach allen Seiten. Die Öffnung wird quasi zur Quelle eines neuen Kugelwellenfeldes.

Daher wird die Ausbreitung von Schallwellen sehr wesentlich durch die Gesetze der Beugung bestimmt. Der Beugung verdanken wir auch die Tatsache, dass wir quasi „um die Ecke hören“ können.

Beugungseffekte und Lärmschutz

Lässt man beispielsweise ebene Schallwellen gegen eine Wand laufen, die eine Blende besitzt, deren Öffnung größer ist als die Wellenlänge λ des Schalls, so ist das hindurchtretende Schallwellenbündel ein Abbild der Geometrie der Blendenöffnung (siehe Bild 5a). Durch die Blende tritt ein ziemlich genau umrissener Schallstrahl hindurch. Sind dagegen die Abmessungen der Öffnung gleich oder gar noch kleiner als die Wellenlänge λ , so erfährt das primär hindurchtretende, schmale Schallwellenbündel eine so starke Beugung nach allen Seiten, dass daraus wieder Kugelwellen entstehen, die sich nach allen Seiten des Halbraumes gleichmäßig ausbreiten (Bild 5b).

Betrachtet man umgekehrt anstelle einer Blendenöffnung ein Hindernis, das sich der Wellenausbreitung entgegenstellt, so beobachtet man ein ganz analoges Geschehen: Ist die Breite des Hindernisses groß gegenüber der Wellenlänge, so lässt es einen „Schallschatten“ entstehen, der den geometrischen Strahlengrenzen entspricht (siehe Bild 6). Ist das Hindernis dagegen klein im Vergleich zur Wellenlänge λ , so verschwindet jegliche Schattenbildung. Das Hindernis ruft höchstens eine geringfügige Störung des Wellenverlaufs hervor, und das auch nur in seiner allernächsten Umgebung (siehe Bild 6).

Beugungseffekte sind von großer Bedeutung z. B. für Abschirmvorrichtungen, die man der unerwünschten Schallausbreitung (Lärm) entgegenstellt. Ihre Wirkung ist allerdings spektral und räumlich begrenzt. Höhe und Gestalt derartiger Abschirmmaßnahmen haben Einfluss auf den erzielbaren Schallschutz. Das können Schallschirme, Bewuchs, Geländeerhebungen oder Schallschutzwälle sein (siehe Bild 7). Der erreichbare Schallschutz ist sehr stark abhängig vom Abstand zwischen der Schallquelle der oberen Kante

(„Beugungskante“) derartiger Maßnahmen. Es soll dadurch ein möglichst „tiefer“ Schallschatten hinter dem Hindernis entstehen.

Es gibt eine Fülle von Alltagsbeispielen für die Wirkung der Schallbeugung. Sehr interessant, aber wenig bekannt, ist der Einfluss der Schallbeugung an unserer Ohrmuschel mit all ihren Erhebungen und Vertiefungen für die Vorne-hinten-Ortung einer Schallquelle, obwohl diese sich genau in der Medianebene unseres Kopfes befindet. Genau diese Formgebung der Ohrmuschel ist es, die bei ihrer Nachbildung für Kunstköpfe besonders viel Mühe bereitet.

Schallbrechung und Schallausbreitung

Genauso bedeutsam wie die beiden zuvor beschriebenen Vorgänge ist auch der nächste Begriff, die Schallbrechung. Auch hier gibt es Ähnlichkeiten zur Optik. Den Brechungseffekt beobachtet man z. B. überall dort, wo Schall sich in geschichteten Medien unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Das bekannteste Beispiel dafür sind Außenluftschichten mit verschiedenen Temperaturgradienten. Luftschichten unterschiedlicher Temperatur sind aber gleichbedeutend mit Schichten unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c von der Temperatur, und zwar speziell für Luft, zeigt das Bild 8. Die mit der dort angegebenen Formel errechneten Schallgeschwindigkeiten c für Temperaturen zwischen beispielsweise -10 °C und $+30\text{ °C}$ sind im gleichen Bild tabellarisch wiedergegeben.

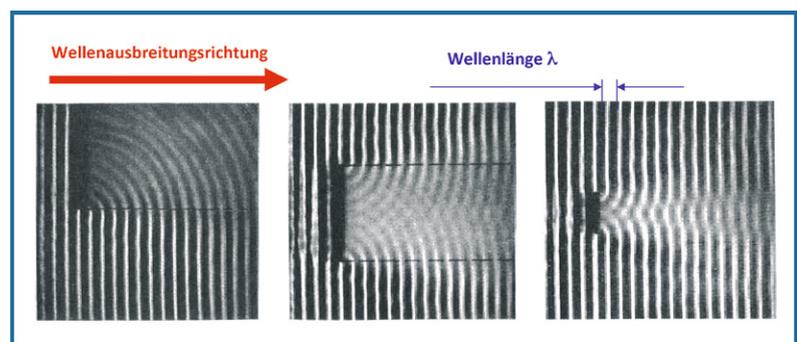


Bild 6: Wellenbeugung an Hindernissen, deren Abmessungen unterschiedlich groß sind im Vergleich zur Wellenlänge λ .

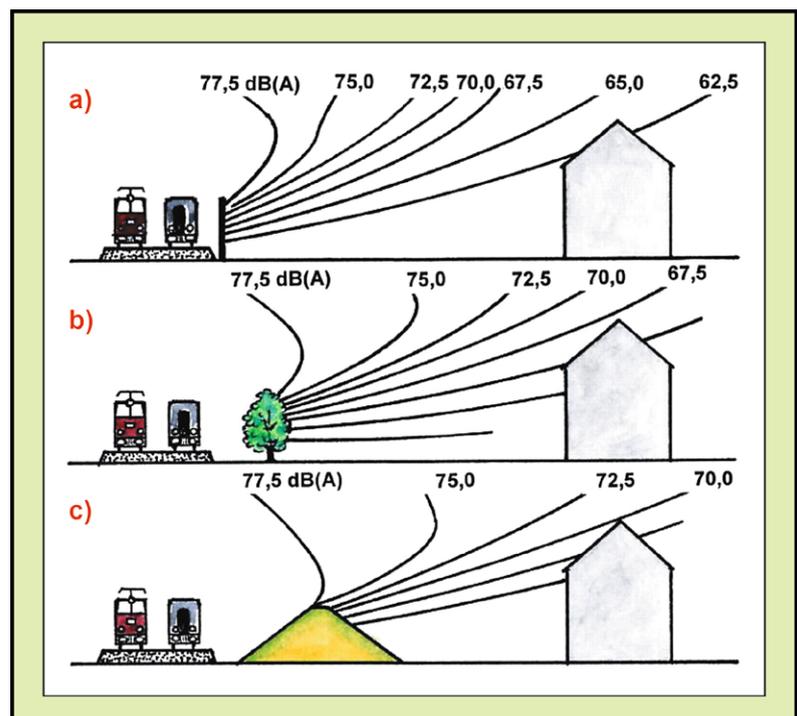


Bild 7: Schallbeugung
 a) an einem Schallschirm, b) an Bewuchs (Bäume) und c) an einem Schallschutzwall



Tabelle 1: Schallgeschwindigkeit c für Luft, abhängig von der Temperatur ϑ [°C]	
Temperatur ϑ [°C] [m/s]	Schallgeschwindigkeit c
- 10	325,3
0	331,4
+ 10	337,4
+ 20	343,3
+ 30	349,1

$$c_L = 331,4 \cdot \sqrt{\frac{\vartheta(^{\circ}\text{C}) + 273}{273}}$$

Bild 8: Die Schallgeschwindigkeit c_L in Luft und ihre Abhängigkeit von der Temperatur ϑ [°C]

Wie die Zahlen belegen, steigt die Schallgeschwindigkeit mit wachsender Temperatur an.

Den Effekt der Schallbrechung an Luftschichten unterschiedlicher Temperatur und somit auch unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit veranschaulicht Bild 9. Trifft Schall aus einem Medium I kommend mit einer Schallgeschwindigkeit c_1 schräg unter einem Einfallswinkel α_1 auf eine Grenzschicht zu einem zweiten Medium II mit einer Schallgeschwindigkeit c_2 ($< c_1$), so wird er dabei nicht nur reflektiert, sondern er dringt in das andere Medium ein und erfährt dabei eine Brechung unter einem kleineren Winkel α_2 zum Lot hin. Die Winkel, unter denen die Brechung stattfindet, werden, in Anlehnung an die Optik, durch den Brechungsindex n_B ($= c_1/c_2 = \sin \alpha_1/\sin \alpha_2$) beschrieben.

Übertragen auf die Verhältnisse im Freien bedeutet das, dass die Brechung von Schall stets in Richtung zur kälteren Luft hin erfolgt. Je nach der meteorologischen Wetterlage (normale Temperaturschichtung oder das Gegenteil davon: Inversionswetterlage) wird der von einer Schallquelle erzeugte Schall somit entweder nach „oben“ oder nach „unten“ gebrochen, siehe Bild 10.

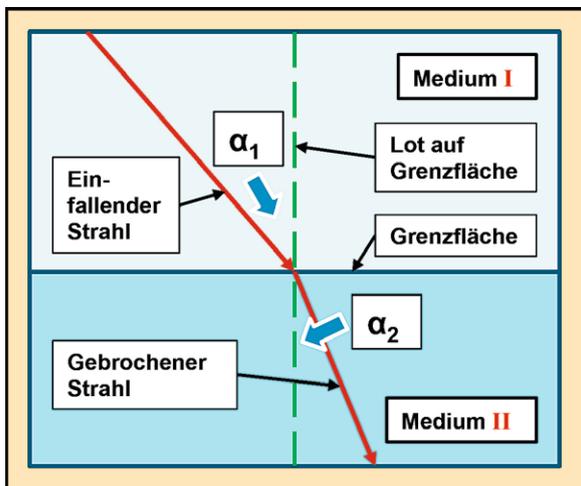


Bild 9: Geometrische Darstellung des snelliusschen Brechungsgesetzes:

α_1 = Einfallswinkel des Licht- bzw. des Schallstrahls
 α_2 = Winkel des gebrochenen Licht- bzw. Schallstrahls
 Beide Winkel beziehen sich auf die Lotlinie zur Grenzfläche. Die Medien I und II unterscheiden sich in ihren Licht- bzw. Schallausbreitungsgeschwindigkeiten c_1 bzw. c_2 .

Das Bild 11 macht noch einen weiteren Sachverhalt deutlich, nämlich, dass bei Temperaturinversion (= bodennahe Kaltluft und wärmere Luft in großer Höhe) Schall über eine sehr große Entfernung übertragen werden kann, z. B. von Flughäfen auf weiter entfernte Ortschaften.

Schallabsorption

Bei der Schallabsorption oder Schalldämpfung wird die Schallausbreitung einer starken Dämpfung unterworfen, wobei Schallenergie, vorwiegend durch Reibung, in Wärme umgewandelt wird. Stoffe, die schallabsorbierende Eigenschaften besitzen, nennt man Schallabsorber oder Schallschluckstoffe. Neben der Schalldämpfung gibt es auch noch die Schalldämmung, über die in einem späteren Beitrag berichtet wird. Hier nur so viel: Im Deutschen klingen beide Begriffe sehr ähnlich, und werden daher leider sehr oft verwechselt.

Im Wesentlichen unterscheidet man heute zwischen

- porösen Absorbern (offenporig oder geschlossenporig),
- Plattenabsorbern,
- Resonanzabsorbern (Helmholtz-Resonatoren) und
- mikroperforierten Absorbern (MPA).

Bei den porösen Absorbern geschieht die Energieumwandlung durch Reibung der schwingenden Partikel des Ausbreitungsmediums (z. B. Luft) und den Skelettelementen des porösen Materials. Resonanzabsorber sind die einzigen Absorber, bei denen keine Energieumwandlung durch Reibung in Wärme stattfindet. Lediglich bei Dämpfungseinlagen zur Verbreiterung des Frequenzbereichs spielt Reibung eine gewisse, wenn auch nur geringe Rolle.

Der Funktionsvorgang bei Resonanzabsorbern beruht im Prinzip lediglich auf einer Abstrahlung von gegenphasigem Schall. Betrachtet man dazu ein Masse-Feder-System, und nichts anderes ist letztlich auch ein Helmholtz-Resonator, der in seiner Resonanzfrequenz zum Schwingen gebracht wird, so schwingt die Masse gegenphasig zur Anregung (siehe Bild 12), ähnlich wie bei einem Jo-Jo auf dem Jahrmarkt. Das Gleiche geschieht auch bei akustischen Resonatoren oder auch bei elektrischen Schwingkreisen. Akustische Resonatoren strahlen dabei Schall in Gegenphase ab und haben somit eine Verringerung des resultierenden Schallpegels zur Folge. Im Ergebnis verhalten sich Resonatoren somit wie Absorber. Und das funktioniert sowohl mit sichtbaren als auch mit nicht sichtbaren Masse-Feder-Systemen.

Über das Thema Absorber wird in einem späteren Beitrag über Raum- und Bauakustik noch ausführlich berichtet. An dieser Stelle sei nur noch der mikroperforierte Absorber vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Lochplatte mit sehr vielen kleinen Bohrungen (Durchmesser: 0,15–0,45 mm), die sich vor einem bestimmten Luftvolumen mit einer dahinter befindlichen festen Rückwand befindet. So ein Gebilde hat – ähnlich wie jedes andere Masse-Feder-System – eine Haupt-Resonanzfrequenz, ähnlich wie ein Helmholtz-Resonator. Die sehr dünnen Bohrungen in

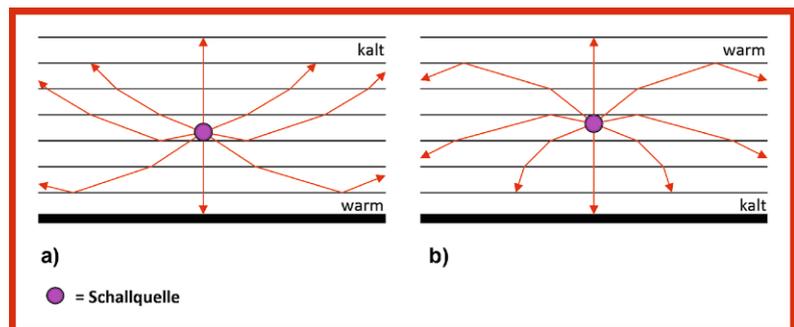


Bild 10: Schallbrechung in (Luft-)Schichten mit unterschiedlichem Temperaturgradienten: a) Sinkt die Temperatur mit zunehmender Höhe (normale Temperaturschichtung an Sommertagen), so wird der Schall nach „oben“ gebrochen. b) Steigt dagegen die Temperatur mit zunehmender Höhe an (Inversionswetterlage), so wird der Schall nach „unten“ zurückgebogen.

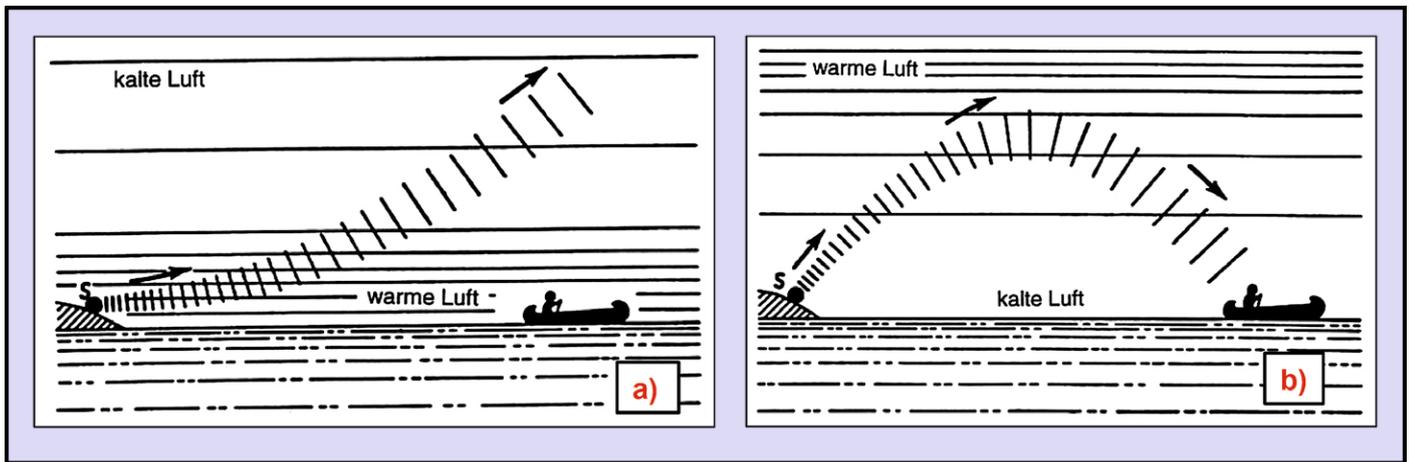


Bild 11: Schallbrechung in Luft mit unterschiedlicher Temperaturschichtung:

a) Normale Wetterlage (tagsüber, im Sommer): Infolge der niedrigeren Schallausbreitungsgeschwindigkeit bei kälterer Luft in größerer Höhe wird der Schall nach „oben“ gebrochen. Seine Wahrnehmbarkeit in größerer Entfernung verringert sich stärker als es nach dem Entfernungsgesetz allein zu erwarten wäre.
 b) Wetterlage bei Temperaturinversion (nachts oder auch an sehr kalten Wintertagen): Bei Inversionswetterlage kann die Luft in großer Höhe wärmer sein als am Boden. Infolge der damit verbundenen höheren Schallgeschwindigkeit in der warmen Luft oben wird der Schall nach „unten“, d. h. zum Boden, zurückgebrochen. Dadurch kann z. B. der sonst kaum hörbare Flugverkehr von weit entfernten Flughäfen plötzlich laut hörbar werden.

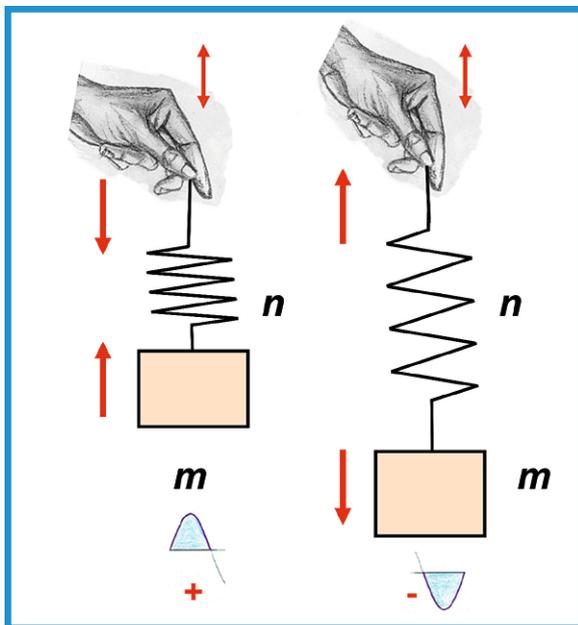


Bild 12: Veranschaulichung des gegenphasigen Schwingens eines schwingfähigen Masse-Feder-Systems bei einer Anregung (hier per Handbewegung) in seiner Resonanzfrequenz f_{res} . Darstellung links: Druck-Halbwellen, Darstellung rechts: Zug-Halbwellen

der Lochplatte sorgen infolge viskoser Reibung der Luft in den Löchern für eine entsprechende Dämpfung und damit für einen breiteren Frequenzbereich des Absorbers.

Diffuses Schallfeld

Schallwellen, die von einer Schallquelle ausgehen, die sich in einem geschlossenen Raum befindet, werden von allen Raumbegrenzungsflächen reflektiert. Treffen diese Wellen nach dem Durchlaufen einer bestimmten Wegstrecke wiederum auf eine Raumbegrenzungsfläche, so werden sie erneut reflektiert, usw. Nach einer gewissen Zeit ist der Raum von Schallwellen vollkommen durchmisch. Der Schalleinfall ist jetzt in jedem Raumpunkt, aus jeder Richtung kommend, gleich wahrscheinlich. Ein solches Schallfeld nennt man diffus. Schaltet man die Schallquelle

plötzlich aus, so fällt der Raumpegel nicht genauso plötzlich ab. Er klingt mit der Zeit ab, und wir nehmen einen Nachhall wahr. Die Zeit, die dabei vergeht, bis der Schallpegel um 60 dB abgeklungen ist, nennt man die Nachhallzeit T [Einheit: s] des Raumes. Das Raumvolumen V [Einheit: m^3], die Nachhallzeit T und die sogenannte äquivalente Absorptionsfläche $A = a \cdot S$ [Einheit: m^2] sind durch eine feste, durch das sabinesche Nachhallgesetz definierte Beziehung miteinander verknüpft. Mehr darüber in einem späteren Beitrag über die Raum- und Bauakustik.

Ausblick

Im diesem zweiten Teil der Beitragsserie haben wir uns mit grundsätzlichen Vorgängen in der Akustik beschäftigt. Das waren die Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption von Schall sowie mit einem kleinen Ausblick auf das Thema diffuses Schallfeld.

Im nächsten Beitrag kommen wir der Elektroakustik schon näher, und zwar über die elektromechanischen Analogien. Bei der Betrachtung mechanischer Schwingungsvorgänge, z. B. bei Schallwandlern einerseits und elektrischen Schaltungen andererseits, drängen sich Analogien zwischen beiden Gebieten geradezu auf. Der Elektrotechniker ist es gewohnt mit Strömen, Spannungen, Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen zu arbeiten. Kräfte, Drücke, Massen, Federn und Reibungswiderstände dagegen liegen ihm etwas ferner. Da es zwischen diesen beiden Arbeitsgebieten Analogien gibt, wonach man für nahezu jeden schwingungstechnischen Vorgang, sei es bei Mikrofonen oder Lautsprechern, ein adäquates elektrisches Ersatzschaltbild konstruieren kann, sollte der Elektrotechniker auch damit umgehen können. **ELV**



Bild 13: Mikroperforierter Absorber (MPA), bestehend aus einer 5 mm starken Acrylglasplatte mit einer Vielzahl sehr feiner Bohrungen, montiert in einem bestimmten Abstand vor einem schallharten Hintergrund