

Abschätzung des Störpegels, verursacht durch Strassenverkehr

Autor(en): **Weber, Heinrich E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **87 (1969)**

Heft 38: **100 Jahre GEP**

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70778>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Hand in Hand mit dieser Horizontalintegration hat die Vertikalintegration von Forst- und Holzwirtschaft zu erfolgen. Dabei scheiden wegen der Struktur der beiden Wirtschaftszweige Lösungen, wie sie im Ausland getroffen werden, zum vornherein aus. Im Ausland sind vielfach Forst- und Holzwirtschaft total integriert, indem Wald- und Holzindustrie dem gleichen staatlichen oder privaten Eigentümer gehören. In unserer liberalen Wirtschaftsordnung ist ein so intensiver Zusammenschluss – wie wohl er bedeutende wirtschaftliche Vorteile mit sich brächte – nicht denkbar. Der Wald ist bei uns zu über 70 % in öffentlichem Eigentum, die Holzwirtschaft (d. h. Holzindustrie, -gewerbe und -handel) ist dagegen fast ausschliesslich privat organisiert. Dies erschwert selbstverständlich die Vertikalintegration erheblich, verhindert sie aber bei beidseitigem gutem Willen keineswegs. Zeugnis dafür legt beispielsweise die erst kürzlich zustandegekommene Interessengemeinschaft Industrieschichtholz ab, in welcher Waldwirtschaft und Holzindustrie als gleichwertige Partner mitmachen.

Ähnliche Schritte zu einer funktionstüchtigen Vertikalintegration sind geplant und sollten eine kräftige Förderung erfahren. So sollten meines Erachtens unter allen Umständen die vielfach noch antiquierten Verkaufsmethoden der Waldwirtschaft verbessert werden, beispielsweise durch Abschluss von mittelfristigen Lieferverträgen. Damit könnte der Produktenfluss vom Wald zum Verbraucher stetiger gestaltet, die Kapazität des Transportgewerbes

besser ausgelastet und Stillstandzeiten der Sägereien vermieden werden. Alle diese Massnahmen zur Rationalisierung hätten eine Verbilligung des Halbfertigfabrikates Holz zur Folge. Damit würde auch die Konkurrenzfähigkeit unserer Holzprodukte auf dem internationalen Markt gehoben, was im Hinblick auf die zunehmende Öffnung der Grenzen entscheidend ins Gewicht fallen dürfte.

Nach diesem zwangsläufig sehr lückenhaften tour d'horizon möchte ich zum Schluss kommen. Es lag mir daran, zu zeigen, dass die schweizerische Forstwirtschaft und die mit ihr auf Ge- und Verderb verbundene Holzwirtschaft in einer Phase des Umbruchs steckt. Es lag mir aber auch daran, zu zeigen, dass wir Forstleute gewillt sind, zukunftsgläubig die sich stellenden grossen Probleme anzupacken und zu lösen. Dabei ist es unser Bestreben, nach Möglichkeit auf eigenen Füßen zu stehen und nicht in Abhängigkeit der öffentlichen Hand zu geraten. Ob uns das gelingt, wird die Zukunft weisen. Der Wille ist vorhanden, möglicherweise werden wir aber von der wirtschaftlichen Entwicklung überrollt. Wie auch diese Entwicklung sein wird, im einen wie im andern Fall bleibt die unumstössliche Tatsache bestehen, dass für die allgemeine Wohlfahrt des Landes die Erhaltung und Pflege des Waldes von entscheidender Bedeutung sein wird.

Adresse des Verfassers: Dr. Peter Grünig, Nationalrat, 5401 Baden, Obere Kehlstrasse 4.

Abschätzung des Störpegels, verursacht durch Strassenverkehr

DK 628.517.2:656.1

Von Prof. H. E. Weber, Zürich

1. Die Schallenergiedichte im einfachsten Fall

Bei der Projektierung von Wohn- und Geschäftsbauten in der Nähe von stark befahrenen Strassen, insbesondere Autobahnen, möchte man sich Rechenschaft geben über die zu erwartende Lärmimmission. Diese soll auch abgeschätzt werden können bei zu erwartendem Mehrverkehr bis zur Vollbelastung der Verkehrsstrasse. Als Unterlagen zu dieser Abschätzung dienen:

1. Die örtliche Lage: Beobachtungspunkt, Strassenführung, feste Hindernisse.
2. Der gewogene Lärmpegel der einzelnen Fahrzeugtypen nach Messvorschrift ISO-Empfehlung Nr. 419: «Méthodes de mesure du bruit émis par les véhicules».
3. Die Erkenntnis, dass die mittlere Schallintensität über eine längere Messzeit unter Berücksichtigung der frequenzmässigen Ohrempfindlichkeit recht gut der subjektiven Lärmempfindung entspricht [1].

Das einzelne Fahrzeug wird als punktförmige Schallquelle betrachtet. Der Schalldruck nimmt umgekehrt proportional mit der Entfernung vom Fahrzeug ab. Bei grossen Entfernungen werden die höheren Frequenzanteile des Lärmspektrums durch die Dämpfung der Luft und durch Absorption in Bodennähe stärker geschwächt als die tieferen. Dieser Einfluss soll jedoch bei der nachfolgenden Berechnung unberücksichtigt bleiben.

Um eine mittlere Schallintensität am Beobachtungsort während einer gegebenen Messdauer T berechnen zu können, muss der Beitrag jedes einzelnen Fahrzeugs zur Gesamtschallenergiedichte bekannt sein. Dazu wird eine Lage vorausgesetzt, wie sie in Bild 1 dargestellt ist. Das Fahrzeug fahre mit konstanter Geschwindigkeit v von A nach B. Ausserhalb von A und B verdecken feste Hindernisse, wie Gebäude, Mauern, Einschnitte oder Böschungen und sofort, die Sicht vom Beobachtungspunkt P auf das Fahrzeug. Sichtbehindernder Wald mit Unterholz muss mindestens 100 m tief in der Beobachtungsrichtung

sein, damit er die gleiche Verminderung des Lärms wie ein festes Hindernis verursacht.

Nach der Messvorschrift der ISO-Empfehlung Nr. 419 wird die Schallintensität eines einzelnen Fahrzeugs mittels eines Präzisions-Schallpegelmessers mit dem Frequenzgang nach Filterkurve A gemäss Empfehlung Nr. 179 des Internationalen Elektrotechnischen Komitees (IEC) gemessen, und zwar für eine Anordnung gemäss Bild 1, wobei aber der senkrechte Abstand des Messpunktes P von der Fahrbahnachse (in Bild 1 mit r_{min} bezeichnet) zu $r_0 = 7$ m festgesetzt ist. Diese Messung ergebe einen maximalen Schalldruck p_0 (Einheit: $\mu\text{bar} = 10^{-6} \text{ bar} = 0,1 \text{ N/m}^2$), aus dem die maximale Schallintensität (Schalleistung pro Flächeneinheit (Einheit: Watt/cm^2) nach der Formel

$$(1) \quad S_0 = p_0^2 / Z$$

berechnet wird. Hierin bedeutet Z die akustische Impedanz (spez. akustischer Widerstand) der Luft unter Normalbedingungen, d. h. bei 20°C , 760 mm QS.

Die momentane Schallintensität S im Beobachtungspunkt P bei der Anordnung nach Bild 1, also im Abstand r , ist:

$$(2) \quad S = S_0 r_0^2 / r^2$$

Integriert man die Schallintensität über die Zeit der Fahrt von A nach B, so erhält man die Schallenergiedichte E (Einheit: J/cm^2)

$$(3) \quad E = \int_A^B S dt$$

Bei gegebenem senkrechten Abstand r_{min} des Beobachtungspunktes P von der Fahrbahnachse und konstanter Geschwindigkeit v des Fahrzeugs lässt sich dieses Integral geschlossen lösen, man erhält:

$$(4) \quad E = S_0 r_0^2 \frac{\varphi_A + \varphi_B}{v r_{min}}$$

wobei φ in rad einzusetzen ist¹⁾. Die Schallenergiedichte hängt somit vom Sichtwinkel $\varphi_A + \varphi_B$, von der Geschwindigkeit v und vom senkrechten Abstand r_{min} des Beobachtungspunktes vom betrachteten gradlinigen Strassenstück ab.

¹⁾ rad = Radiant ist das Verhältnis des Kreisbogens zum Kreisradius.

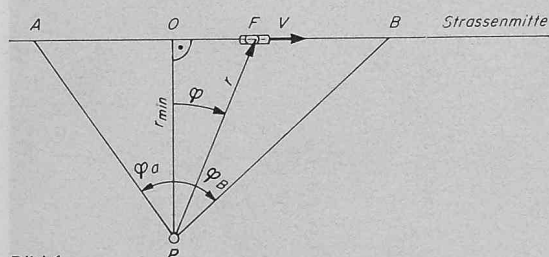


Bild 1

2. Die Schallenergiedichte im Falle einer Strasse mit Kurve

Bei einer Anordnung nach Bild 2, die häufig vorkommt, kann die Schallenergiedichte eines einzelnen Fahrzeugs grundsätzlich in der Weise berechnet werden, dass man den Strassenzug in n einzelne geradlinige Stücke zerlegt und für jedes Strassenstück ν den senkrechten Abstand r_ν und den Sichtwinkel φ_ν herausmisst. Es ist dann allgemein:

$$(5) \quad E = \nu \sum_1^n E_\nu; \text{ wobei } E_\nu = S_{0\nu} r_0^2 \frac{\varphi_\nu}{\nu_\nu r_\nu}$$

3. Totale Schallenergiedichte bei gegebenem Verkehrsfluss

Die totale Schallenergiedichte während der Messdauer T bei einem gegebenen Verkehrsfluss ist die Summe der Schallenergiedichten aller Einzelfahrzeuge, die in der Zeit T vorbeifahren. Zur Vereinfachung ist es in der Praxis üblich, die Einzelfahrzeuge zu Kategorien zusammenzufassen, die verschiedene Normalschallpegel p_0 (gemessen im Abstand $r_0 = 7$ m) aufweisen. Bei Autobahnen sind auch Fahrzeuge mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten verschiedenen Kategorien zuzuteilen. Da jedoch in Gl. (4) die Geschwindigkeit v im Nenner und die Schallintensität S_0 im Zähler stehen und beide Grössen positiv korreliert sind (eine Zunahme der Geschwindigkeit erhöht die Schallintensität, aber verringert die Durchfahrzeit), können die Kategorien recht grob gewählt werden (zum Beispiel PKW mit 100 km/h; LKW mit 80 km/h mit den entsprechenden Werten für p_0).

Bei zwei- und dreispurigen Strassen ist die Geschwindigkeit bei starkem beidseitigem Verkehr einheitlich, und es kommt nur noch auf die Zahl der Fahrzeuge in der Messzeit T pro Kategorie an; wobei sich die insgesamt N Kategorien lediglich durch ihre p_0 -Werte unterscheiden. Alsdann kann gesetzt werden:

$$(6) \quad E_{\text{tot}} = \mu \sum_1^N E_\mu n_\mu$$

worin bedeuten: E_μ die Schalleistung des Einzelfahrzeuges der Kategorie μ und n_μ die Anzahl Fahrzeuge der Kategorie μ in der Zeit T .

Die äquivalente Schallintensität während der Messzeit T ergibt sich nach der Gleichung

$$(7) \quad S_{\text{äq}} = \frac{E_{\text{tot}}}{T} = \frac{p_{\text{äq}}^2}{Z}$$

Der äquivalente Schalldruck $p_{\text{äq}}$ lässt sich auch in dB angeben und wird dann als Q -Wert bezeichnet. Für die Umrechnung gilt die Beziehung:

$$(8) \quad Q = 10 \lg \frac{S_{\text{äq}}}{S_g} = 20 \lg \frac{p_{\text{äq}}}{p_g}$$

wobei S_g die Bezugsschallintensität für die Festlegung des Nullpunktes

der Dezibelskala für den Schalldruck bei Normalatmosphäre bedeutet; es sind:

$$S_g = 10^{-16} \text{ W/cm}^2$$

$$p_g = 0,0002 \text{ } \mu\text{bar} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ N/cm}^2$$

Der Q -Wert ist ein recht gutes Mass für die Lärmbelastung des Normalohres, bezogen auf die Zeit T .

Die für verschiedene Beobachtungspunkte berechneten Q -Werte können benutzt werden, um mit Hilfe der Tabelle der Schallpegel-Grenzrichtwerte in dB die Zonenzugehörigkeit nach [2] zu bestimmen. Die Q -Werte liegen zwischen den Werten für das Grundgeräusch und denen für die häufigen Spitzen.

5. Beispiel

Für die auf Bild 2 dargestellte Lage mit einer ausserorts liegenden Zweispurstrasse soll der Q -Wert für den Punkt P an einem Werktag mit Hauptverkehr, zum Beispiel von 17 bis 18 h, unter folgenden Annahmen bestimmt werden: Es verkehren pro Stunde 3000 Personenwagen (PW) und 600 Lastwagen (LW) in beiden Richtungen zusammen mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h. Der Typenschallpegel (für $r_0 = 7$ m) betrage für die Personenwagen $P_{0P} = 78$ dB (A), für die Lastwagen $P_{0L} = 90$ dB (A), die Messzeit T sei eine Stunde.

Zunächst wird die gesamte Schallenergiedichte im Punkt P in einer Stunde berechnet. Hierzu dient Formel (6) mit E_μ nach Formel (4); auf das vorliegende Beispiel angewendet lautet sie:

$$(9) \quad E_{\text{tot}} = (S_{0P} n_P + S_{0L} n_L) \frac{r_0^2}{v} \sum_1^n \frac{\varphi_\nu}{r_\nu}$$

Mit den Zahlenwerten der Tabelle 1 für $\sum \varphi_\nu/r_\nu$ und mit $r_0 = 7$ m, $v = 72000$ m/h wird:

$$\frac{r_0^2}{v} \sum_1^n \frac{\varphi_\nu}{r_\nu} = 5,5 \cdot 10^{-5}$$

und es ergibt sich die äquivalente Schallenergiedichte für $T = 1$ h zu

$$S_{\text{äq}} = \frac{E_{\text{tot}}}{T} = 5,5 \cdot 10^{-5} (S_{0P} n_P + S_{0L} n_L)$$

Da der Q -Wert in dB zu bestimmen ist und die Typenschallpegel p_{0P} und p_{0L} ebenfalls in dB angegeben sind, wird diese Gleichung durch Division mit der Bezugsschallintensität $S_g = 10^{-12}$ W/cm² umgeformt!

$$(10) \quad \frac{S_{\text{äq}}}{S_g} = 5,5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{S_{0P}}{S_g} n_P + \frac{S_{0L}}{S_g} n_L \right)$$

Für den gesuchten Q -Wert gilt Gleichung (8), für die Typenschallpegel ist zu setzen:

$$P_{0P} = 10 \lg \frac{S_{0P}}{S_g} = 78 \text{ dB}; P_{0L} = 10 \lg \frac{S_{0L}}{S_g} = 90 \text{ dB.}$$

Daraus erhält man:

$$\frac{S_{0P}}{S_g} = 10^{7,8} = 6,31 \cdot 10^7; \frac{S_{0L}}{S_g} = 10^{9,0}$$

In Gleichung (10) eingesetzt, wird:

$$S_{\text{äq}}/S_g = 5,5 \cdot 10^{-5} (1,89 \cdot 10^{11} + 6,00 \cdot 10^{11}) = 4,34 \cdot 10^7$$

woraus mit Gleichung (8) folgt:

$$Q = 10 \lg 4,34 \cdot 10^7 = 76 \text{ dB.}$$

Tabelle 1. Aus Bild 2 abgemessene Zahlenwerte zum Beispiel

ν	φ_ν rad	r_ν m	φ_ν/r_ν rad/m
1	1,071	35	0,0306
2	1,037	35	0,0296
3	0,543	46	0,0118
4	0,432	50	0,0087
$\sum \varphi_\nu/r_\nu = 0,0807$			

Dies entspricht der Zone VI «Hauptverkehrsader». Würden keine Lastwagen verkehren, aber gleichviele Personenwagen (3000 pro Stunde), so erhielte man einen Q -Wert von 64 dB, was etwa der Geschäftszone entsprechen würde. Die Lärmbelastung hängt also in sehr starkem Mass vom Lastwagenverkehr ab, was durchaus mit der Wirklichkeit übereinstimmt.

Schlussbemerkung

Das angegebene Berechnungsverfahren mit der Summation der Schallenergiedichte ist für den lebhaften Strassenverkehr berechtigt, da stets viele unkorrelierte Schallquellen (Fahrzeuge) den Momentanwert der Schallintensität erzeugen. Die Mittelwertbildung über die gesamte Energiedichte in der Zeit T , also die Summierung der Energiedichten der einzelnen durchfahrenden Fahrzeuge ist auch deshalb zulässig, weil in etwa gleicher Entfernung von der Strasse, wie der mittlere Abstand der Fahrzeuge beträgt, die Schallintensitäts-

schwankungen relativ klein sind. Gerade für starken Verkehr eignet sich die Methode gut. Einige Unsicherheit bringen die Annahmen über die Lautstärkeentwicklung der einzelnen Fahrzeugtypen mit sich. Es ist aber ohne weiteres möglich, durch entsprechende Messungen und Zählungen an Autobahnen die notwendigen Unterlagen zu gewinnen.

Literatur:

- [1] Koppe, E., K. Matschat und E. A. Müller: «Acustica» 16 (1965/66), Heft 4, S. 251.
- [2] Lärmbekämpfung in der Schweiz. Bericht der Eidg. Expertenkommission an den Bundesrat, 1963, S. 62.

Adresse des Verfassers: Prof. Heinrich Weber, Institut für Fernmeldetechnik und Laboratorium für Elektroakustik der ETHZ, Sternwartstr. 7, 8006 Zürich.

Alte und neue Probleme der Anfachung von Gasschwingungen

Von Prof. Dr. N. Rott, ETH Zürich

DK 534.14:534-13

1. Einleitung

Eines der lästigen Probleme des Raumzeitalters sind die Gasschwingungen, welche in Raketenmotoren vorkommen können. Diese Schwingungen werden durch thermische Effekte erregt; es ist die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Verbrennung und damit der Wärmeerzeugung, welche die Anfachung von gewissen akustischen Schwingungsformen bewirkt. Die Zahl dieser möglichen Formen ist gross, denn es können zum Beispiel Schwingungen mit umlaufender Phase vorkommen, bei denen sozusagen eine spiralförmige Fortpflanzung der akustischen Störung stattfindet. Die Störungen können sich von der Brennkammer weiter fortpflanzen, zunächst in die Brennstoffleitungen; im Flug kann eine Koppelung zwischen den Schwingungen im Schub und der ganzen Flugdynamik entstehen, wobei die auftretenden periodischen Schub- und Trägheitskräfte den ganzen Flugkörper beanspruchen.

Besonders anfällig auf derartige Störungen sind die ganz grossen Raketen, bei denen die akustische Dämpfung verhältnismässig klein ist. Erleichternd wirkt sich aber der Umstand aus, dass die Beanspruchungen nur während der kurzen Lebensdauer der Raketen ausgehalten werden müssen und deshalb noch innerhalb von vergleichsweise weiten Grenzen toleriert werden können.

Diese aktuellen Probleme haben auch das Interesse an gewissen altbekannten akustischen Erscheinungen neu belebt, bei denen auch eine thermische Anfachung stattfindet, aber keine Verbrennung; statt einer «inneren» Wärmequelle kann dem Gas Wärme von aussen zugeführt werden. Solche Effekte sollten eigentlich genau vorausgerechnet werden können, wenigstens in der linearen akustischen Näherung; auch sind sie in langen Rohren beobachtet worden, die einfacher zu behandeln sind als «Hohlräume». Es ist deshalb überraschend, dass bisher nur zwei dieser altbekannten Erscheinungen eine vollständige quantitative theoretische Lösung erhalten haben, und dazu erst in neuester Zeit; über diese soll hier berichtet werden ohne auf eine weitere Diskussion des erstgenannten Problems in den Raketen einzugehen.

Bevor die Probleme der Anfachung angegriffen werden, sei ein kurzer Überblick der klassischen Theorie der Dämpfung von akustischen Schwingungen in Rohren gegeben.

2. Die akustische Dämpfung in Rohren

A. Historische Übersicht

Die Theorie der Dämpfung von Schallwellen in Rohren beginnt mit H. v. Helmholtz, der im Jahre 1863 eine Formel veröffentlicht hatte, welche die Dämpfung durch die Reibung an den Rohrwänden erfasst. Allerdings hat Helmholtz den Weg zu seiner Formel nicht angegeben; Lord Rayleigh hat später in seinem berühmten Werk, «The Theory of Sound», unter der Annahme einer dünnen Reibungsschicht («Grenzschicht») an der Wand, eine Herleitung der Helmholtzschen Formel durch eine Impulsbilanz gegeben.

Nun aber ist die Dämpfung von Schallwellen im Rohr nicht nur durch die Reibung an der Wand, sondern zu etwa gleichen Teilen auch durch Wärmeleitung zur Wand verursacht. Dieser Effekt, von R. Kundt zunächst vermutet, wurde theoretisch durch die klassische Abhandlung von G. R. Kirchhoff erfasst, die im Jahre 1868 (in «Poggen-

dorffs Annalen») erschienen ist und die die Grundlage der Theorie der akustischen Dämpfung bildet. Entsprechend ihrer Bedeutung hat Rayleigh eine sehr ausführliche Darstellung dieser Arbeit in sein Buch aufgenommen.

Die Kirchhoffsche Theorie ist «exakt» in dem Sinne, dass die linearen akustischen Gleichungen ohne weitere Vernachlässigung von Reibungs- und Wärmeleitungsgliedern für beliebige Rohrweiten- und -längen gelöst wurden. Ein grosser Teil der Literatur über akustische Dämpfung beschäftigt sich mit der expliziten Auswertung von Sonderfällen der Kirchhoffschen Theorie.

Ein wichtiger Sonderfall ist der von Helmholtz behandelte, bei dem die Reibungsgrenzschicht dünn gegenüber dem Rohrdurchmesser angenommen wird. Da für Gase bekanntlich die Dicken von Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschichten von gleicher Grössenordnung sind, kann auch die Kirchhoffsche Theorie auf diesen Sonderfall angewendet werden. Hierfür kann man von den fertigen Endergebnissen von Kirchhoff ausgehen und die gewünschten mathematischen Grenzfälle herleiten; es ist aber auch möglich, von Anfang an die Theorie im Sinne der Grenzschichtvereinfachungen aufzubauen. Der zweite Weg ist für den modernen Aerodynamiker, der in der von Ludwig Prandtl im Jahre 1904 geschaffenen Grenzschichttheorie gut geschult ist, besonders naheliegend. Da das Kirchhoffsche Problem linear ist, wird (und wurde zunächst historisch) die Grenzschichttheorie nicht benötigt; ihre Verwendung hat aber den Vorteil, dass sie einen sehr guten Einblick in den Dämpfungsmechanismus gewährt. Eine kurze Übersicht der wesentlichen Gedanken einer «schrittweisen Näherung» durch die Grenzschichttheorie sei nun gegeben.

B. Grenzschichttheorie

Schritt 1: Zunächst werden alle Effekte der Reibung und der Wärmeleitung vernachlässigt. Wir betrachten als Ausgangslösung der wohlbekannten akustischen Wellengleichung den Spezialfall einer stehenden periodischen Welle. Es sei ein Rohr der Länge L angenommen mit einem offenen Ende bei $x = 0$, während das andere Ende (bei $x = L$) geschlossen sei. Die (axiale) akustische Geschwindigkeit u_a verschwindet für $x = L$, während für $x = 0$ die Grenzbedingung gilt, dass der akustische Druck p_a (d. h. die Druckdifferenz gegen die Atmosphäre) verschwindet. Die Grössen u_a und p_a im Rohr sind durch die Formeln

$$(1) \quad u_a = u_0 \cos(\omega x/a) \cos \omega t \quad \text{und}$$

$$(2) \quad p_a = \rho a u_0 \sin(\omega x/a) \sin \omega t$$

gegeben, wobei ρ die Dichte und a die Schallgeschwindigkeit im Gas bedeuten; u_0 ist die Geschwindigkeitsamplitude für $x = 0$, und die Kreisfrequenz ω ist

$$(3) \quad \omega = \frac{\pi a}{2L}$$

In der heute allgemein üblichen Schreibweise für zeitlich periodische Lösungen wird ein komplexer Zeitfaktor $e^{i\omega t}$ angenommen und nach Übereinkunft nicht mehr ausgeschrieben; der Realteil der Lösung ist die physikalische Grösse. Demnach wären die Formeln (1) und (2) zu ersetzen durch: