

Akustische Grundlagen der Musik

Herausgegeben von Stefan Weinzierl

LESEPROBE

Laaber

SCHALLEREIGNISSE UND MUSIK.
TYPOLOGIE, BESCHREIBUNG, ANALYSE

Stefan Weinzierl

Schallereignis und Hörereignis

Die Akustik beschäftigt sich mit der Erzeugung von Schall, der Ausbreitung von Schall (auch mit deren Verhinderung), der Messung und der Wahrnehmung von Schall. Schall ist zunächst ein physikalisches Phänomen, bei dem sich elastische Verformungen als Schwingungen um einen Gleichgewichtszustand durch ein Medium in Form von Wellen ausbreiten. Je nach Zustand des Mediums unterscheidet man Körperschall, Flüssigkeitsschall und Luftschall. Hierbei treten verschiedene Geometrien der Verformung auf: Als Longitudinalwelle bezeichnet man Schwingungen der Teilchen eines Mediums um ihre Ruhelage in Ausbreitungsrichtung der Welle, so wie das bei Luftschall der Fall ist. An den Oberflächen von Festkörpern können sich auch Transversalwellen ausbreiten, wozu z.B. die Schwingungen des Resonanzkörpers von Musikinstrumenten oder von Klangstäben gehören.

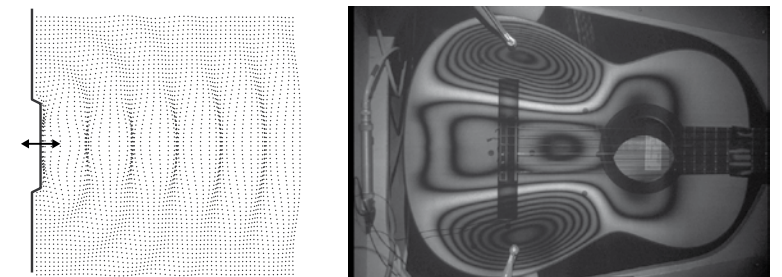


Abb. 1: Verschiedene Schallformen und übliche Varianten der Visualisierung. Links: Die Schwingung einer Lautsprechermembran erzeugt Luftschall, der sich in Bewegungsrichtung der Teilchenschwingungen ausbreitet (Longitudinalwelle). Gezeigt ist eine Momentaufnahme der um ihre Ruhelage ausgelenkten Teilchen des Mediums. Rechts: Korpus-Schwingungen einer Gitarre bei einer bestimmten Anregungsfrequenz, sichtbar gemacht durch holographische Interferometrie (Körperschall). Der Schwärzungsgrad zeigt Linien mit gleicher Auslenkung. Helle Bereiche sind unbewegt (Knotenlinien der Schwingung). Die Bewegung geht aus vom Gitarrensteg, der die Schwingung der Saite auf den Resonanzboden überträgt. Dessen Bewegung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Transversalwelle, Bildnachweis siehe S. 347).

Im Gegensatz zu Strömungsphänomenen wie Wind oder Konvektionsbewegungen findet beim Schall kein Stofftransport statt; das Medium als Ganzes bleibt in Ruhe, lediglich die Teilchen des Mediums schwingen um ihre Ruhelage und geben ihre Energie durch Wechselwirkung mit den benachbarten Teilchen weiter. Aufgrund der Rückstellkräfte im stofflichen Verbund der Schallteilchen bildet sich lokal eine Schwingung aus; da sich jeder dieser Schwingungszustände aufgrund mechanischer Wechselwirkung durch das Medium fortpflanzt, bildet sich eine Welle aus, welche die räumliche Struktur des Schallereignisses beschreibt (s. Abb. 1). Auch wenn die Schallwelle durch innere Reibungsverluste im Verlauf der Ausbreitung allmählich an Energie verliert, kommt sie an der Grenzfläche eines Mediums nicht zum Stehen. So überträgt sich die Körperschall-Bewegung des Resonanzkörpers einer Violine auf das benachbarte Luftvolumen und pflanzt sich dort bis zum Trommelfell des Hörers fort, wo es erneut in Körperschall gewandelt, über das Mittelohr weitergeleitet und im Innenohr in neuronale Impulse verwandelt in das auditorische System des Menschen eingeleitet wird.

Während der englische Begriff *sound* sowohl den physikalischen als auch den psychologischen Aspekt von akustischen Phänomenen bezeichnet, wird im Deutschen genauer zwischen der physikalischen und der psychologischen Domäne der Akustik unterschieden, d.h. zwischen *Schall* und *Laut* bzw. zwischen *Schallereignis* und *Hörereignis*. Ein Hörereignis bildet sich, wenn die Frequenzen und die Intensitäten von Schallschwingungen in einem bestimmten, unserem Wahrnehmungsapparat zugänglichen Bereich liegen. Bei periodischem, sinusförmig verlaufendem Luftschall entsteht ein Hörereignis in einem Frequenzbereich zwischen etwa 16 und 16.000 Hz. Darunter werden sie als Vibrationen (Infraschall) wahrgenommen, darüber werden sie als Ultraschall unserem Gehör unzugänglich. Insbesondere periodische, sich regelmäßig wiederholende Modulationen bilden die für Musik so konstitutive Wahrnehmung einer *Tonhöhe* aus.

Schallsignale werden in der Akustik zum Teil anhand ihrer physikalischen Natur, den von ihnen ausgelösten Empfindungen oder den damit kommunizierten Inhalten begrifflich klassifiziert. So werden Schallereignisse als *Töne* bezeichnet¹, wenn sie eine Tonhöhenempfindung auslösen, als *Klänge*, wenn sie aus mehreren Tonhöhen bestehen. Als *Geräusch* werden Schallanteile bezeichnet, die nicht zur Übertragung von musikalischen oder andersartigen

1 Der Sonderfall eines sinusförmigen Schalldruckverlaufs soll demgegenüber als *Sinuston* ausgewiesen werden.

Informationen dienen, sondern als (meist unerwünschte) Begleiterscheinung auftreten. Als *Rauschen* werden Schallsignale bezeichnet, die aus Sicht des Empfängers nur mit statistischen Kennziffern, und nicht durch eine analytische Funktion (wie etwa die Sinusfunktion) beschreibbar sind.² Der Aspekt der *Klangfarbe* hat sich seit jeher als schwer definierbar erwiesen. Während die amerikanische Standardisierung zur Definition aller Eigenschaften anführt, die es erlauben, zwei Töne gleicher Tonhöhe und gleicher Lautstärke als unterschiedliche wahrzunehmen³, also eine Art negativer Definition gibt, betont der deutschsprachige Standard (s. Anm. 2), dass es sich um eine mehrdimensionale Wahrnehmungskategorie mit Attributen wie hell/ dunkel oder scharf/stumpf handelt, die überwiegend durch das Frequenzspektrum des Schallereignisses bestimmt ist.

An dieser Stelle wird bereits die Schwierigkeit deutlich, Wahrnehmungsinhalte (wie Klangfarbe, Tonhöhe oder Lautstärke) eindeutig auf physikalische Phänomene abzubilden oder – im Sprachgebrauch der Psychologie – Reiz- und Empfindungsqualitäten einander eindeutig zuzuordnen. Je höher die Stelle innerhalb der perceptiven und kognitiven Verarbeitung von Schallsignalen, an der sich bestimmte Eindrucksqualitäten manifestieren, desto schwerer gelingt diese Zuordnung – zum einen, weil eine immer größere Menge an sensorischer Information integriert wird, zum anderen, weil Top-down-Prozesse der Wahrnehmung eine immer größere Rolle hierbei spielen. So lassen sich elementare sensorische Kategorien wie die wahrgenommene Lautstärke eines Tons relativ gut an die physikalische Intensität des Schallsignals rückbinden, während bei der Wahrnehmung der Klangfarbe bereits verschiedene Informationen über die spektrale Verteilung und den zeitlichen Verlauf eines Tons integriert und in Bezug zur Identität des Wahrnehmungsinhalts gesetzt werden. Eine Oboe wird also nur dann als »hell« wahrgenommen, wenn die spektrale Verteilung relativ zu unserer Vorstellung und unseren Erwartungen an den Klang einer Oboe starke hochfrequente Anteile enthält. Die gleiche spektrale Verteilung kann bei einer Piccoloflöte zu einer ganz anderen Bewertung führen.

Auch unter der Prämisse, dass Wahrnehmungen immer durch Reize ausgelöst werden, kann also die sensorische und kognitive Verarbeitung des physikalischen Stimulus so komplex und der Einfluss der individuellen und kulturellen Prägung des Hörers so groß sein, dass eine einfache Zuordnung von Reiz und Empfindung kaum möglich ist.

2 DIN 1320:2009, Akustik – Begriffe.

3 ANSI S1.1-1960(R1976)-12.9.

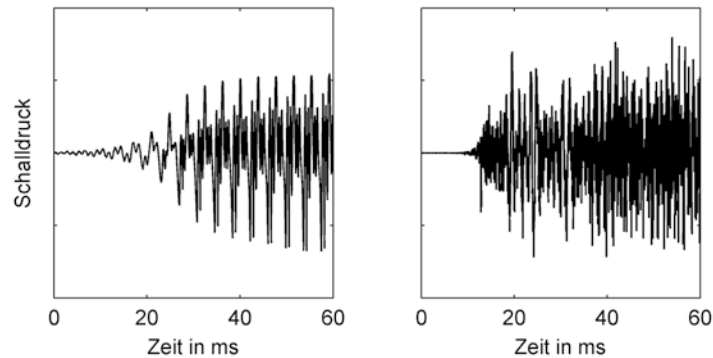


Abb. 2: Musikalische Schallsignale, mit der »Lupe« betrachtet: Tonanfänge einer Klarinette (links) und eines Beckenschlags (rechts). Im einen Fall bildet sich in kürzester Zeit ein weitgehend periodischer Verlauf mit klar empfundener Tonhöhe heraus, im anderen Fall ein rauschhafter Verlauf, der zwar eine Klangfarbe, aber keine Tonhöhe besitzt.

Als allgemeinsten Ausdruck für sich zeitabhängig verändernde Größen wird in der Nachrichtenübertragung der Begriff des *Signals* verwendet. Er bezeichnet Größen, die sich in Abhängigkeit von Zeit oder Ort verändern und durch diese Veränderung Information repräsentieren. Signale können, ohne dass sich an ihrer physikalischen Natur etwas verändert, durch mathematische Operationen transformiert werden, um auch diese Weise Eigenschaften sichtbar zu machen, die in der ursprünglichen Darstellung nicht sichtbar waren, etwa durch eine spektrale Darstellung (siehe unten). Das Pendant zum Begriff des Signals ist der des *Systems*, womit physikalische oder mathematische Vorrichtungen und Prozesse bezeichnet werden, die Signale verändern. Dazu gehören Mikrofone, die ein akustisches Eingangssignal in ein elektrisches Ausgangssignal verwandeln, ebenso wie eine akustische Übertragung im Raum, bei der sich Eigenschaften des Schallsignals verändern, etwa durch die Überlagerung von Schallreflexionen am Hörerort. Zur Beschreibung von Signalen und Systemen wurde in der Nachrichtentheorie in breites Spektrum an Verfahren und Darstellungsweisen entwickelt, die auch in der musikalischen Akustik eingesetzt werden, um die Erzeugung und Übertragung von Schallsignalen als Träger musikalischer Information zu beschreiben.

Schall und Schallfeldgrößen

Luftschall ist eine longitudinale Kompressionswelle, d.h. eine Verdünnung und Verdichtung des Mediums, die sich entlang der Ausbreitungsrichtung der Schwingung verändert und mit einer festen, von den Eigenschaften des Mediums abhängigen Geschwindigkeit ausbreitet. Die Kompression des Mediums führt für eine ganze Reihe von physikalischen Größen zu Schwankungen um einen Gleichgewichtswert. Dazu gehört Auslenkung und Geschwindigkeit (Schnelle) der Teilchen, sowie die lokale Schwankung von Druck, Dichte und Temperatur um das atmosphärische Gleichgewicht. Diese Größen verändern sich in ihrem orts- und zeitabhängigen Verlauf in einem Medium stets in analoger Weise. Dass meistens Schalldruck und Schallschnelle zur Beschreibung von Schallfeldern herangezogen werden, liegt daran, dass sie einer Messung am leichtesten zugänglich sind. So reagieren Mikrofone entweder auf den Schalldruck oder den (analog zur Schallschnelle verlaufenden) lokalen Gradienten des Schalldrucks. Auch das menschliche Außenohr ist funktional als Druckempfänger angelegt.

Schalldruck und Schallschnelle

Als *Schalldruck* p bezeichnet man die durch die lokale Verdichtung des Mediums bedingte Abweichung p vom statischen Luftdruck p_0 . Somit gilt zu jedem Zeitpunkt

$$p_{ges} = p_0 + p \quad (1)$$

Wenn nicht der zeitliche Verlauf des um die Nulllage schwankenden Wechselschalldrucks p , sondern dessen Stärke durch einen Einzahlwert ausgedrückt werden soll, so wird meist der sog. Effektivwert p_{eff} angegeben. Er berechnet sich aus dem über ein anzugebendes Analysefenster der Dauer T gebildeten, quadratischen Mittelwert durch

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2)$$

Für harmonische, d.h. sinus- oder cosinusförmige Verläufe liegt der Effektivwert um den Faktor 0,71 niedriger als der Scheitelwert der Schwingung, d.h. der höchste im Zeitverlauf erreichte Schalldruckwert. Da der Druck die Kraft F (in Newton) angibt, die pro Fläche S (in Quadratmetern) auf einen Körper einwirkt ($p = F/S$), trägt er die Einheit Newton/Quadratmeter oder Pascal ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$).

Verglichen mit dem atmosphärischen Druck ist der Schalldruck sehr klein. Während der statische Luftdruck auf Meereshöhe im Mittel 101325 Pa beträgt (häufig in der alten Einheit als 1013 mbar angegeben), bewirkt ein eben hörbarer Sinuston mit einer Frequenz von 1000 Hz nur eine Druckschwankung um 0,00002 Pa und selbst am Platz des Dirigenten eines im *fortissimo* spielenden Sinfonieorchesters beträgt der Schalldruck nicht mehr als 2 Pa. Das menschliche Gehör ist also ein äußerst sensibler Druckempfänger und die in Abb. 1 skizzierte örtliche Auslenkung der Luftmoleküle um ihren Ruhepunkt ist in Wirklichkeit stark überzeichnet. Auch die *Schallschnelle* v führt bereits bei sehr geringen Werten in der Größenordnung von 50 Nanometern/Sekunde zu einem hörbaren Schallereignis.

Formelzeichen	Schalldruck	Schallschnelle
Einheit	p	v
	[Pa] = [N/m ²]	[m/s ⁻¹]
Hörschwelle bei 1 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Wald bei wenig Wind	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Aufmerksames Publikum im Konzertsaal	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Sinfonieorchester im <i>piano</i>	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Sinfonieorchester im <i>forte</i>	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Sinfonieorchester im <i>fortissimo</i> am Dirigentenplatz	2	$5 \cdot 10^{-3}$
Start von Düsenflugzeugen aus 200 m Entfernung	20	$5 \cdot 10^{-2}$
Schmerzgrenze	200	$5 \cdot 10^{-1}$

Tabelle 1: Schalldruck und Schallschnelle von Alltagsgeräuschen und für musikalische Schallsignale an einem typischen Hörerplatz.

Schallgeschwindigkeit

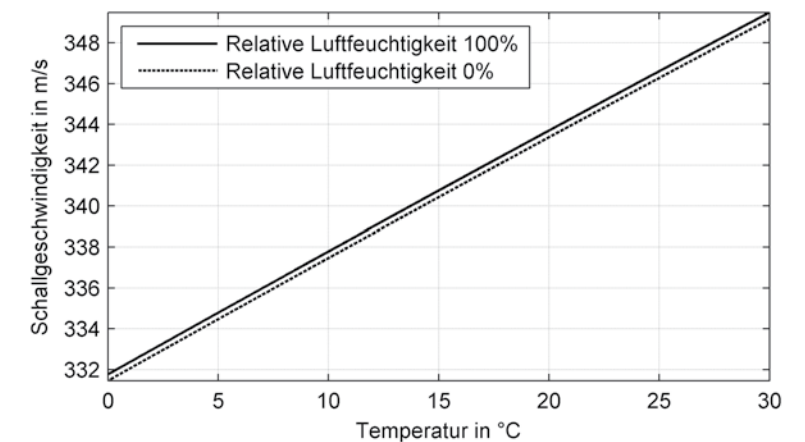
Die *Schallgeschwindigkeit* c gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich eine Schallwelle innerhalb des Mediums ausbreitet.⁴ Sie ist durch die Materialeigenschaften des Mediums gegeben. Für ideale Gase⁵ lässt sich die Schallgeschwindigkeit aus den thermodynamischen Zustandsgleichungen ableiten und beträgt

- 4 Die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) ist nicht mit der Geschwindigkeit der lokalen Bewegung der Teilchen um ihre Ruhelage (Schallschnelle) zu verwechseln.
- 5 Das *ideale Gas* ist ein physikalisches Modell, bei dem die Moleküle eines Stoffes als ausdehnungslose Massepunkte angenommen werden, die ihre Bewegungsenergie, wie Billardkugeln, ausschließlich durch Stöße an benachbarte Moleküle weitergeben.

$$c = \sqrt{\frac{\kappa R T}{M_{\text{mol}}}} \quad (3)$$

Die Gleichung enthält mit der Gaskonstante $R = 8,314$ Newtonmeter/(mol·Kelvin) eine universelle Konstante, mit dem Adiabatenexponent κ (für zweiatomige Gase wie Sauerstoff und Stickstoff ist $\kappa \approx 1,4$) und der molaren Masse M_{mol} (für Luft ist $M_{\text{mol}} \approx 0,029$ kg/mol) zwei stoffabhängige Konstanten, außerdem die Temperatur T in Kelvin. Für Luft als Medium der Schallausbreitung hängt die Schallgeschwindigkeit c in (Meter/Sekunde) somit vor allem von der Temperatur, in geringerem Umfang auch von der genauen Zusammensetzung der Luft (damit etwa von der Luftfeuchtigkeit) ab (Abb. 3).

Abb. 3: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte.



Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit erklärt eine Reihe musikalischer Phänomene. Dazu gehört der Anstieg der Tonhöhe von Blasinstrumenten oder Orgelpfeifen mit der Temperatur. Da die Schallwellenlänge des schwingenden Luftvolumens hier durch die Geometrie des Körpers vorgegeben ist, steigt die Frequenz der Schwingung, wenn sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle im Rohr z.B. aufgrund einer veränderten Raumtemperatur oder durch die Atemluft des Spielers erhöht. Dadurch kann es zu Intonationsproblemen mit anderen Instrumenten kommen, zumal mit solchen, bei denen – wie bei Saiteninstrumenten – die Tonhöhe mit steigender Temperatur sogar abnimmt. In flüssigen und festen Medien ist die Schallgeschwindigkeit um ein Vielfaches höher als in Luft (Tabelle 2).

Stoff	c in m/s^1
Luft	344
Wasser	1492
Kupfer	3900
Im Instrumentenbau verwendete Holzarten	5000–6000

Tabelle 2: Einige Schallgeschwindigkeiten in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern.

Frequenz und Wellenlänge

Schallwellen breiten sich mit einer festen, durch die thermodynamischen Bedingungen und die Materialeigenschaften des Mediums gegebenen Geschwindigkeit c aus. Daraus ergibt sich zwangsläufig ein umso kürzerer Abstand zwischen zwei Punkten gleichen Schalldrucks entlang der Ausbreitungsrichtung (Wellenlänge λ), je höher die Frequenz f der Schwingung ist. Es gilt

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

Der Bereich hörbaren Schalls mit Frequenzen von 16 bis 16.000 Hz entspricht somit Schallwellenlängen von 21 m für die tiefsten bis 2,1 cm für die höchsten hörbaren Töne.

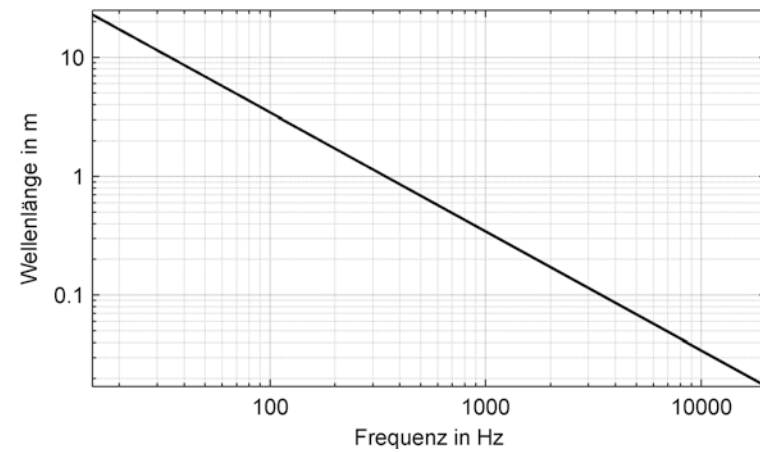


Abb. 4: Frequenz und Wellenlänge von Schallwellen im hörbaren Bereich zwischen 16 Hz und 16 kHz.