

Stefan Weinzierl, Anselm Goertz

Technische Grundlagen der Beschallung von Räumen

Open Access via institutional repository of Technische Universität Berlin

Document type

Book chapter | Accepted version

(i. e. final author-created version that incorporates referee comments and is the version accepted for publication; also known as: Author's Accepted Manuscript (AAM), Final Draft, Postprint)

This version is available at

<https://doi.org/10.14279/depositonce-15238>

Citation details

Weinzierl, S.; Goertz, A. (2017) Technische Grundlagen der Beschallung von Räumen. In: Rötter, G. (eds) Handbuch Funktionale Musik. pp. 91–119. (Springer Reference Psychologie) Springer, Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-10219-7_4.

Terms of use

This work is protected by copyright and/or related rights. You are free to use this work in any way permitted by the copyright and related rights legislation that applies to your usage. For other uses, you must obtain permission from the rights-holder(s).

Technische Grundlagen der Beschallung von Räumen

Stefan Weinzierl, Anselm Goertz

Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, Berlin, Deutschland

Korrespondenzautor: S. Weinzierl

E-Mail: stefan.weinzierl@tu-berlin.de; anselm.goertz@t-online.de

Zusammenfassung

Jegliche Form der Beschallung, von kleinen Einbaulautsprechern im Auto bis zu großvolumigen Line Array Systemen in Sportstadien oder bei Open Air Events mit 100.000 Zuhörern, benötigt ein elektroakustisches Wandler-System, d. h. ein Gerät, das elektrische Energie in Schallwellen verwandelt. Die Eigenschaften des damit aufgebauten Lautsprechers hängen vom physikalischen Prinzip und von der Konstruktion des Wandlers (auch als *Treiber* bezeichnet) ebenso ab wie von seinem Einbau in ein Gehäuse und der vorgeschalteten Elektronik. Sobald mehr als ein einzelner Lautsprecher betrieben wird, ergeben sich die Eigenschaften der Beschallungsanlage als Ganzes daraus, wie verschiedene Lautsprecher zusammenwirken, um in einem mehr oder weniger ausgedehnten Hörbereich einen gut ausbalancierten Höreindruck zu erreichen. Dies reicht von der zweikanaligen Stereo-Wiedergabe bis zu Systemen mit mehreren Hundert Lautsprechern und entsprechend komplexer Signalverteilung.

Dieser Systematik folgt der Aufbau des Kapitels, das zunächst den Aufbau eines einzelnen Lautsprechers behandelt, um in einem zweiten Abschnitt auf Prinzipien beim Zusammenwirken mehrerer Lautsprecher einzugehen, die man je nach Anwendung als *Wiedergabeverfahren* oder als *Beschallungstechnik* bezeichnen kann.

Schlüsselwörter

Lautsprechersysteme • Beschallungstechnik • Wiedergabeverfahren • Beschallung im Kraftfahrzeug • Elektroakustik

1 Lautsprechersysteme

1.1 Wandlertechnologien

Lautsprecher erzeugen Schall, indem sie durch die Bewegung einer Membran das vor der Membran liegende Luftvolumen komprimieren bzw. dekomprimieren und sich diese Druckschwankung als Welle durch das umgebende Medium fortpflanzt. Die Form der Membran kann ebenso unterschiedlich sein wie das physikalische Prinzip, welches für den Antrieb der Membran eingesetzt wird. Die mit Abstand größte Verbreitung hat der elektrodynamische Wandler, wie in Abb. 1 skizziert.

Bei elektrodynamischen Wandlern wird eine Schwingspule beweglich im Luftspalt eines Permanentmagneten gehalten. Durch das Anlegen einer Wechselspannung werden die Spule und die an ihr befestigte Membran durch die sog. Lorentzkraft (Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld) in Bewegung gesetzt. Ein Treibersystem wie in Abb. 1 ist in der Regel für einen bestimmten Frequenzbereich optimiert. Die untere Grenze ergibt sich durch die Größe des

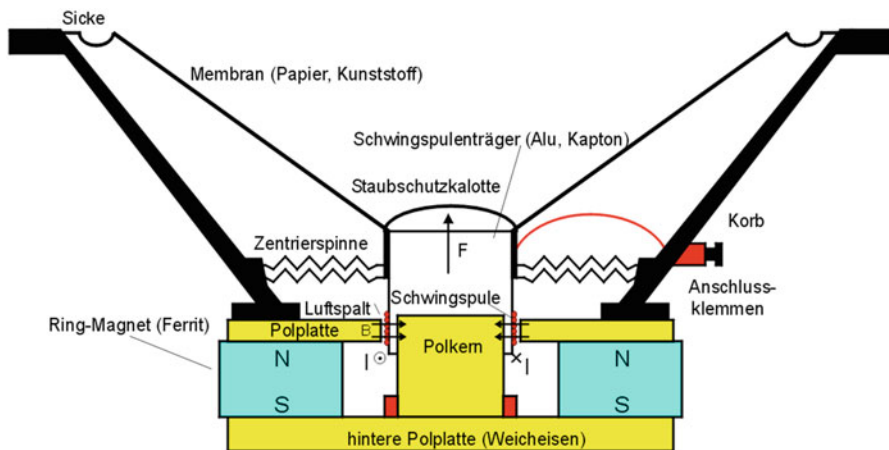


Abb. 1 Schnittbild durch einen elektrodynamischen Lautsprecher mit Konusmembran und Permanentmagnet. Die Schwingspule wird durch eine Zentrierspinne und die Sicke beweglich im Luftspalt eines Permanentmagneten gehalten. Eingezeichnet sind die Richtung des magnetischen Feldes B im Luftspalt, die Stromflussrichtung I im Draht der Schwingspule und die daraus resultierende Antriebskraft F (Lorentzkraft)



Abb. 2 Elektrodynamische Lautsprecher in unterschiedlichen Bauformen: 2-Wege-System mit Konusmembran als Tieftöner (vgl. Abb. 1) und Kalottenmembran als Hochtöner, für den Einsatz als Nahfeldmonitor im Studiobereich (links). 2-Wege-System als sog. Koaxial-Lautsprecher, mit dem Hochtöner montiert im Zentrum einer Konusmembran (Tieftöner), für den Einbau im Auto (rechts)

Treibers und dessen mechanische Resonanzfrequenz aus der bewegten Masse und der Federsteifigkeit der Aufhängung: Zur Erzeugung von tieffrequentem, langwelligem Schall ist eine ausreichende Membranfläche erforderlich, da die Effektivität der Umwandlung von mechanischer in akustische Energie abhängig vom Verhältnis der Membranfläche zur abgestrahlten Wellenlänge ist. Der Wirkungsgrad als Verhältnis der abgestrahlten akustischen Leistung zur eingespeisten elektrischen Leistung liegt bei Lautsprechern je nach Bauart und Frequenzbereich bei 0,2 % für einfache HiFi-Lautsprecher bis zu 30 % bei großen Hornlautsprechern.

Die obere Grenze des abgestrahlten Frequenzbereichs resultiert aus der Neigung der Membran, die bei hohen Frequenzen und, damit verbunden, großen Beschleunigungskräften, keine starre, gleichphasige Bewegung mehr ausführt, sondern in sog. Partialschwingungen zerfällt. Bei diesen bewegt sich zum Beispiel nur noch der unmittelbar mit der Schwingspule verbundene, innere Teil der Membran, während der äußere Rand unbewegt bleibt oder sogar gegenphasige Bewegungen ausführt. Dies lässt sich auch durch die Verwendung besonders steifer Materialien nicht verhindern, zumal die Membran insgesamt möglichst leicht sein soll.

Aus diesem Grund sind die meisten Lautsprecher, die den gesamten hörbaren Bereich von etwa 20 bis 16.000 Hz abdecken sollen, als Mehrwegsysteme ausgeführt, bei denen unterschiedliche Frequenzbereiche von einem Hoch- und Tieftöner (2-Wege-System), einem Hoch-, Mittel- und Tieftöner (3-Wege-System) oder durch noch aufwendigere Konstruktionen bespielt werden (Abb. 2). Bei Mehrwegsystemen trennt eine elektronische oder digitale Filterschaltung, die sog. Frequenzweiche, das vom Verstärker kommende elektrische Signal bereits vor der elektroakustischen Wandlung in entsprechende Frequenzbereiche auf (vgl. Abschn. 1.3).

Während Tieftöner fast immer durch eine Konusmembran mit elektrodynamischem Antrieb realisiert werden, gibt es bei Hochtönern ein größeres Spektrum an Membran- und Antriebsformen. Dazu gehören *Bändchenlautsprecher*, bei denen auf

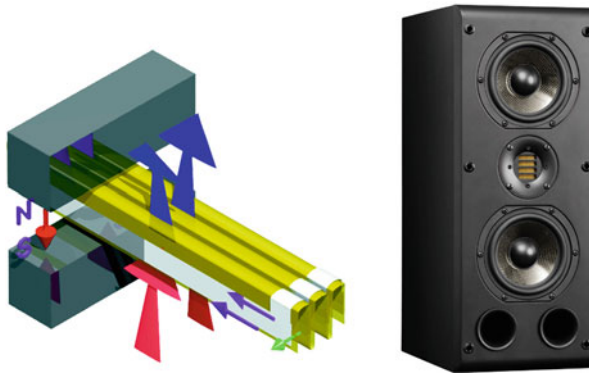


Abb. 3 Prinzip des Air-Motion-Transformers (links): Ein in Lamellenform gefaltetes Bändchen wird durch einen auf die Lamellen aufbrachten, stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eines Permanentmagneten je nach Stromflussrichtung gefaltet oder auseinandergezogen. Rechts: Einsatz als Hochtöner zwischen zwei Tief-Mitteltönern in Konusform und zwei zusätzlichen Bassreflexionsöffnungen (unten) in einem 2-Wege-System für Heimkino-Anwendungen

eine als dünne Folie konstruierte Membran Leiterbahnen direkt aufgebracht sind. Die Schwingspule befindet sich quasi in abgewickelter Form auf der Membranfläche. Durch die geringe Masse der Folie im Vergleich zu einer Hochtonmembran mit Schwingspule und Spulenträger kann der Treiber sehr schnell auf Spannungsänderungen reagieren, was insbesondere für die Übertragung hoher Frequenzen vorteilhaft ist. Da die Antriebskraft zudem gleichmäßig verteilt auf der gesamten Membranfläche angreift, ist die Neigung zu unkontrollierten Partialschwingungen geringer als bei herkömmlichen Konus- oder Kalottenlautsprechern.

Ein verwandtes Wandlerkonzept ist der sog. *Air-Motion-Transformer*, auch als Accelerated Ribbon Technology (ART) bezeichnet. Das Antriebsprinzip entspricht dem eines Bändchens, die Membran ist jedoch in Lamellenform gefaltet. Da benachbarte Lamellen in entgegengesetzter Richtung vom Strom durchflossen werden, bewegen sich die Lamellen – abhängig von der Polarität der Spannung – wie bei einer Ziehharmonika aufeinander zu oder voneinander weg und stoßen die Luft aus ihren Zwischenräumen heraus. Durch dieses Prinzip kann bei gleicher Außengeometrie eine größere Membranfläche wirksam werden, mit entsprechend größerem elektroakustischem Wirkungsgrad. Abb. 3 zeigt das Zusammenwirken von äußerem Magnetfeld, Stromfluss und Bewegung der Membran (links) sowie die Verwendung als Hochtöner in einem 2-Wege-System für Heimkino-Anwendungen.

Ebenfalls als Hochtöner eingesetzt werden *piezoelektrische Wandler*, deren Funktion auf der Eigenschaft bestimmter Kristalle und Keramiken beruht, die sich proportional zu einer angelegten Spannung verformen (piezoelektrischer Effekt) und die so eine angekoppelte Membran antreiben können. Insbesondere in Kombination mit einem Horn können mit piezoelektrischen Wandlern preiswerte Hochtonsysteme realisiert werden.

Eine breitbandige Wiedergabe kann mit verschiedenen Typen von *Biegewellenschwingern* erreicht werden. Bei ihnen wird eine Fläche (etwa eine Membran) nicht

Abb. 4 Prototyp einer berührungsempfindlichen Bedienoberfläche für einen Klein-PC (Intel NUC), die als DML-Panel und gleichzeitig als Lautsprecher wirksam wird



als Ganzes zum Schwingen gebracht, sondern so angeregt, dass sich Biegewellen auf ihr ausbreiten und Schall abstrahlen. Die Anregung kann durch eine herkömmlich konstruierte Schwingspuleneinheit erfolgen, von der aus sich Biegewellen nach außen auf einem biegeweichen Material ausbreiten. Hochfrequente Anteile klingen aufgrund der hohen inneren Dämpfung des Plattenmaterials schneller ab und sind nur in der Nähe der Anregung zu beobachten, während die effektive Strahlerfläche zu tiefen Frequenzen zunimmt.

Einem ähnlichen Prinzip folgen *Distributed Mode Lautsprecher* (DML). Auch hier schwingt die Fläche nicht wie bei einem herkömmlichen Lautsprecher als Ganzes, sondern es breiten sich vielfältige Schwingungsverteilungen auf der Fläche aus, die durch rückseitig angebrachte Exciter als Antriebseinheiten angeregt werden, die aus Schwingspulen- oder Piezo-Treibern bestehen können. Unter Design-Aspekten attraktiv ist die Tatsache, dass DML-Systeme auf den ersten Blick nicht als Lautsprecher erkennbar sind, sondern mit Paneelen fast beliebiger Größe konstruiert werden können. Diese können gleichzeitig als Bild-Projektionsfläche oder in Kombination mit berührungsempfindlichen Sensoren als Bedienoberfläche verwendet werden (Abb. 4).

1.2 Einbau- und Gehäuseprinzipien

Nur bei sog. Breitband-Lautsprechern wird das ganze hörbare Frequenzspektrum durch einen einzigen Wandler erzeugt. In der Regel werden bei Lautsprechern zwei bis drei Systeme in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut, von denen jedes nur für die Abstrahlung eines definierten Frequenzbands verantwortlich ist (Tief-/Hochtöner oder Tief-/Mittel-/Hochtöner, s. Abb. 2 und 3). Eine elektrische Frequenzweiche sorgt dafür, dass jedes System auch elektrisch nur mit dem jeweiligen Frequenzband angesteuert wird.

Für den Tieftonbereich wird häufig nicht nur die durch die Membranfläche abgestrahlte akustische Leistung eingesetzt, da zum Erreichen hoher Schalldrücke eine große Membranfläche und große Membranauslenkungen erforderlich wären.

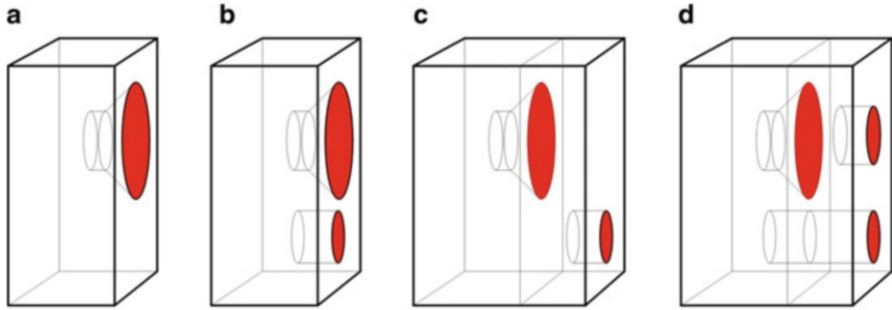


Abb. 5 Gehäusekonzepte für Tieftonlautsprecher. A: Geschlossenes Gehäuse. Das Gehäuse hinter der Membran wirkt als zusätzliche Feder und erhöht die Resonanzfrequenz des eingebauten Wandlers. B: Bassreflex-Gehäuse, bei dem die Luftfeder des Gehäusevolumens zusammen mit der Luftmasse des Tunnels einen Resonator ausbildet, der über die Bassreflex-Öffnung Schall abstrahlt und den Lautsprecher partiell in der Schallabstrahlung unterstützt. C: Bandpassgehäuse Typ 1, bei dem sich der eigentliche Lautsprecher in einem geschlossenen Gehäuse befindet und mit der Membranvorderseite einen Resonator antreibt, der den Schall abstrahlt. D: Bandpassgehäuse Typ 2, bei dem der Lautsprecher mit der Membranvorderseite und Rückseite je einen Resonator antreibt, die beide den Schall abstrahlen (nach Goertz 2008, S. 432)

Zur Unterstützung der Abstrahlung im Tieftonbereich gibt es mehrere Gehäuseprinzipien. So bildet in einem *Bassreflex-Gehäuse*, das durch den Treiber rückseitig komprimierte Luftvolumen als Feder zusammen mit dem als Masse wirkenden Luftvolumen im Tunnel (Port) des Gehäuses einen sog. Helmholtz-Resonator, dessen Schwingung über die Bassreflexöffnung nach außen geführt wird (Abb. 3, rechts). Während in einem geschlossenen Gehäuse die Resonanz des Luftvolumens im Gehäuse meist durch zusätzlich eingebrachtes Dämpfungsmaterial unterdrückt werden muss (Abb. 5, A), wird sie im Bassreflex-Gehäuse für die Schallabstrahlung in den Raum verwendet (Abb. 5, B); sie entlastet den Treiber im Arbeitsbereich des Resonators und erlaubt dadurch geringere Membranauslenkungen. Durch den zusätzlichen Resonator steigt die Empfindlichkeit und die Gehäusegröße kann somit verringert werden. Insbesondere in der Beschallungstechnik, wo es auf hohe Schallleistungen ankommt, werden auch *Bandpass-Gehäuse* eingesetzt, bei denen der Treiber überhaupt nicht mehr direkt abstrahlt, sondern über seine Vorder- und/oder über seine Rückseite ein oder zwei Luftvolumina als Resonatoren antreibt (Abb. 5, C und D).

Als *Horntrieb* oder, falls der Lautsprecher nur aus einem solchen Treibersystem besteht, als *Hornlautsprecher* bezeichnet man Systeme, bei denen eine Membran nicht direkt nach außen abstrahlt, sondern über einen definiert geformten, im Querschnitt zunehmenden Schallkanal an das umgebende Medium angekoppelt ist. Durch die mit dem Schallkanal erreichte, kontinuierliche Anpassung des Wellenwiderstands des Lautsprechers an die sog. Schallkennimpedanz der Außenluft wird ein höherer Wirkungsgrad, d. h. eine höhere abgestrahlte Schalleistung bei gleichem elektrischen Antrieb erzielt. Praktisch eingesetzt werden vor allem Exponentialtrichter, bei denen sich die Querschnittsfläche des Hornes entsprechend einer Exponentialfunktion nach außen vergrößert, oder konische Hörner, bei denen der Radius

Abb. 6 Gefalteter Hornlautsprecher in einer Beschallungsanlage für Sprachdurchsagen



linear zunimmt. Um die äußere Länge eines Trichters zu verkürzen, kann das Horn gefaltet werden. Gefaltete Hörner sind im Tieftonbereich wegen der großen erforderlichen Längen des Trichters meist die einzig praktikable Lösung. Gefaltete Trichter sind jedoch auch bei kompakten Mittelton-Hörnern für die Sprachwiedergabe anzutreffen (Abb. 6), auch wenn sie hohen Ansprüchen an die Wiedergabe aufgrund von internen Resonanzen und Reflexionen, bedingt durch Sprungstellen im Verlauf der Hornfunktion, nicht genügen.

In der Beschallungstechnik für große Publikumsflächen kommen seit den 1990er-Jahren zunehmend nicht mehr einzelne Lautsprecher, sondern *Arrays* oder *Cluster* von Lautsprechern zum Einsatz. Mit ihnen lässt sich ein definiertes und für den Einzelfall präzise konfigurierbares räumliches Abstrahlverhalten erreichen. Besondere Bedeutung haben sog. *Line Arrays*, die aus übereinander und häufig in einer gekrümmten Linie angeordneten Lautsprechermodulen bestehen und die als 2- oder 3-Wege-Systeme ausgeführt sind (Abb. 17 rechts). Durch die kohärente und relativ zur Wellenlänge dichte Anordnung der Einzelquellen entsteht eine kontrollierte Bündelung des abgestrahlten Schalls, die sich genau auf die Publikumsfläche ausrichten lässt. Aufgrund der großen vertikalen Abmessung nähert sich die Abstrahlcharakteristik des Gesamtsystems dem Verhalten einer Linienquelle an, bei der der Schalldruckpegel mit Entfernung von der Quelle mit 3 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt, anders als bei Einzellautsprechern mit annähernd kugelförmiger Abstrahlung und 6 dB Abnahme pro Entfernungsverdopplung. Auf diese Weise lassen sich auch größere Publikumsflächen gleichmäßiger mit Schall versorgen als dies mit herkömmlichen Einzelsystemen der Fall ist.

1.3 Elektronik

Zur Elektronik eines Lautsprechers gehören in erster Linie Frequenzweichen zur Trennung der Signale für Mehrwegelautsprecher, Entzerrungsfilter zur Linearisierung des Frequenzgangs, sowie im weiteren Sinn auch Leistungsverstärker und Schutzschaltungen gegen Überlastung und zur Funktionskontrolle des Lautsprechers. Eine Besonderheit im Zusammenspiel von Lautsprechern und Verstärkern

ist die 100 V-Technik, die bei sog. Elektroakustischen Lautsprecheranlagen (ELA) verbreitet ist, wie sie insbesondere für Sprachdurchsagen verwendet werden. Quellen (Verstärker) und Senken (Lautsprecher) werden dabei mit Hilfe von Übertragern (Trafos) so angepasst, dass sie ihre Nennleistung bei 100 V Spannung abgeben bzw. aufnehmen. Durch die Transformation auf eine höhere Spannung sind die Leitungsverluste geringer und es können entsprechend größere Entfernungen überbrückt werden. Nahezu alle Lautsprecheranlagen in öffentlichen Bereichen wie Flughäfen, Bahnhöfen oder Kaufhäusern arbeiten mit 100 V-Technik, da sich hier die speisenden Verstärker meist weit entfernt von den Lautsprechern in einer Technikzentrale befinden.

Die *Frequenzweiche* soll mit Hilfe von elektrischen Filtern das Audiosignal für Mehrwegesysteme (Tief-, Mittel-, Hochton etc.) in passende Frequenzbänder aufteilen. Meist werden hierbei auch die einzelnen Wege in ihrer Empfindlichkeit zueinander angepasst und Korrekturen im Frequenzgang vorgenommen. Bei passiven Weichen wird die gewünschte Filterfunktion durch passive Bauelemente wie Spulen, Kondensatoren und Widerstände im Signalweg zwischen Verstärker und Lautsprecher angenähert. Der Entwurf dieser Filter ist nicht trivial, da ausgangsseitig auch der Lautsprecher mit seinem stark frequenzabhängigen Impedanzverlauf berücksichtigt werden muss. Filterstufen mit hoher Flankensteilheit erfordern zudem einen hohen Bauteilaufwand und können zu großen Signalverlusten in den Weichen führen. Eine geringe Flankensteilheit bei passiven Weichen führt andererseits zu Interferenzeffekten zwischen den einzelnen Wegen, da in den Übernahmebereichen, etwa zwischen Mittel- und Hochtönen, beide Systeme abstrahlen und zu richtungsabhängigen Verstärkungen und Auslöschungen führen können. Aufgrund dieser Schwierigkeiten werden passive Weichen in professionellen Studiomonitoren nur noch selten und bei Lautsprechern für die Beschallungstechnik meist nur in kleineren Systemen oder in den Topteilen eingesetzt.

Während sich passive Weichen stets im Signalweg zwischen Leistungsverstärker und Lautsprecher befinden, arbeiten aktive Weichen, egal ob in analoger oder digitaler Ausführung, immer vor der Endstufe, sodass jeder Weg über eine eigene Endstufe versorgt wird und die Aufteilung bereits vorher im leistungsfreien Signalbereich erfolgt. Aktive Filter zur Systemverzerrung und als Frequenzweiche bei Lautsprechern können bei gleicher Filterwirkung mit geringerem Materialaufwand realisiert werden, sie verursachen geringere Verlustleistungen, es gibt (aufgrund der Verortung vor der Endstufe mit sehr großem Innenwiderstand) keine Impedanzrückwirkung, und jeder Lautsprecher kann mit einer jeweils passenden Endstufe angetrieben werden. Hat die Schaltung neben der reinen Frequenzweiche noch weitere Funktionalitäten wie Pegeleinstellungen, Phasenabgleich oder einen Limiter, der den Lautsprecher vor einer Überlastung durch das elektrische Eingangssignal schützt, wird sie auch als *Controller* bezeichnet. All diese Funktionen können prinzipiell sowohl mit analoger Schaltungstechnik als auch durch digitale Signalprozessoren (DSPs) realisiert werden. Sowohl in der Beschallungstechnik wie im Studiobereich wurden in den vergangenen Jahren jedoch zunehmend vollständig digital arbeitende Controller entwickelt, bei denen sich die Einstellungen, etwa in Abhängigkeit von der Akustik des Wiedergaberaums oder der Hörposition frei

konfigurieren und speichern lassen. Im Zusammenspiel mit digitalen Mischpulten oder anderen digitalen Signalquellen kann so eine durchgängig digitale Signalkette aufgebaut werden. Über den Funktionsumfang analoger Modelle hinaus können Effekte wie Signalverzögerung (Delays), vorausschauende Limiter und einige besondere Filtertypen realisiert werden.¹

Digitale Controller lassen sich durch IIR-Filter (Infinite Impulse Response) mit rekursiver Struktur oder durch FIR-Filter (Finite Impulse Response) mit nicht-rekursiver Struktur aufbauen. FIR-Filter erfordern eine höhere Rechenleistung des digitalen Signalprozessors als IIR-Filter; sie erlauben jedoch eine unabhängige Behandlung von Amplitudengang und Phasenverlauf. Dadurch werden sog. linearphasige Filter möglich, bei denen es nicht zu einer frequenzabhängigen Verzögerung von Signalmodulationen (Gruppenlaufzeit) kommt. Der Preis hierfür liegt in einer gegenüber IIR-Filtern höheren Latenz, die je nach Anwendung zwischen 1 und 50 ms liegen kann. Bei reiner Studiowiedergabe ist dies unkritisch, anders als in der Beschallungstechnik, wo neben dem verstärkten Signal auch das akustische Signal hörbar ist und eine zu große Verzögerung für die Musiker oder den Sprecher problematisch ist. Hier werden Latenzen von mehr als 10 ms vermieden, wodurch Linearphasigkeit erst ab einer Frequenz oberhalb von etwa 200 Hz erreicht werden kann.

Im Amplitudenverlauf ermöglichen aktive bzw. digitale Filter eine präzisere Systementzerrung, durch eine leichte Pegelanhebung im Bassbereich kann zudem der Frequenzgang des akustischen Systems nach unten ausgedehnt werden (Abb. 7). Der FIR-Filter ermöglicht ein vollständig linearphasiges Gesamtsystem mit Entzerrung und Laufzeitkorrektur. Mit FIR-Filtern gibt es pro Weg nur noch ein einzigen Filter, der alle Funktionen in sich vereint. Die Berechnung erfordert allerdings eine genaue Kenntnis des Amplituden- und Phasenganges des zugehörigen Lautsprechers.

1.4 Kenndaten

Wichtigste Messgröße für die akustische Wirkung und das Klangbild eines Lautsprechers ist das Übertragungsmaß, d. h. das Verhältnis von erzeugtem Schalldruck zu anliegender Spannung in Abhängigkeit von der Frequenz. Es wird bei Lautsprechern als logarithmierter Schalldruckpegel (dB SPL) für „1 W/1 m“ angegeben, d. h. für eine Eingangsspannung, die einer elektrischen Leistung von 1 W an der Nennimpedanz des Lautsprechers entspricht (meist 4 oder 8 Ω) und auf eine Entfernung von 1 m in der Hauptabstrahlrichtung des Lautsprechers bezogen wird (-*Sensitivity*, s. Abb. 8 rechts oben). Das Übertragungsmaß wird in der Regel frequenzabhängig für einen Messpunkt in 0°-Richtung vor dem Lautsprecher angegeben. Angestrebt wird ein über einen möglichst großen Frequenzbereich lineares Übertragungsmaß, d. h. eine neutrale Charakteristik des Wandlers, die sich nicht durch mit spektralen Überhöhungen oder Einbrüchen einhergehende

¹Vgl. Müller 1999.

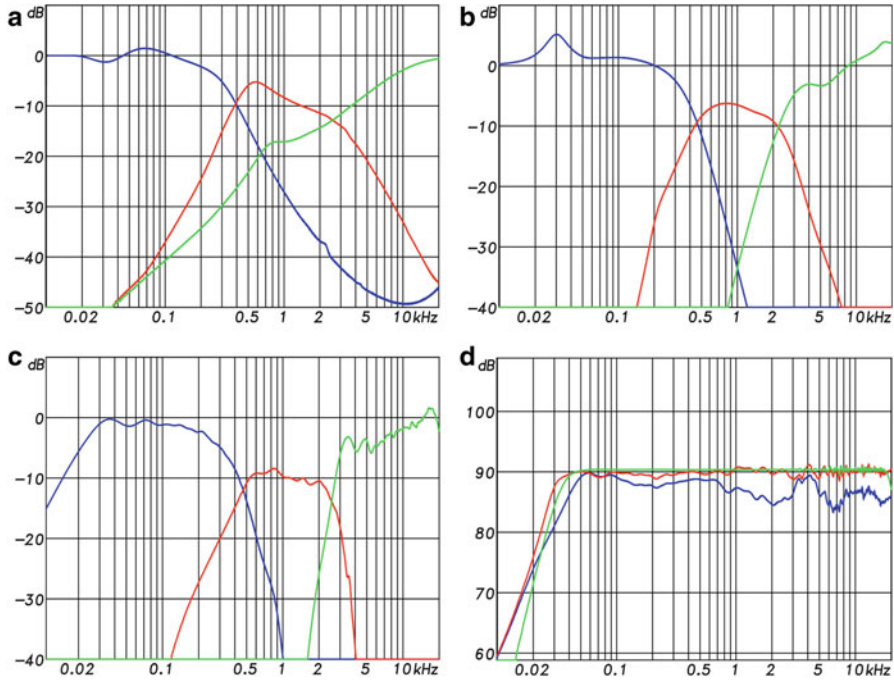


Abb. 7 Entzerrung eines 3-Wege-Lautsprechers durch verschiedene Filtertypen. A: Amplitudenfrequenzgang der passiven Frequenzweiche, wie vom Hersteller eingebaut. B: Amplitudenfrequenzgang eines digitalen IIR-Filters 4. Ordnung mit 24 dB/Oktave Flankensteilheit. C: Amplitudenfrequenzgang eines digitalen FIR-Filters, das neben der Frequenzweichenfunktion auch eine hoch aufgelöste Systementzerrung für den Amplituden- und Phasengang liefert. D: Resultierender Amplitudenfrequenzgang des Lautsprechers mit passivem (blau), aktivem bzw. digitalem IIR-Filter (rot) sowie digitalem FIR-Filter (grün)

Klangverfärbungen bemerkbar macht. Bei Lautsprechern wird der Frequenzbereich, in dem das Übertragungsmaß um nicht mehr als 10 dB gegenüber dem über einer Oktave im Bereich maximaler Empfindlichkeit gemittelten Bereich abfällt, als *Übertragungsbereich* bezeichnet. Je nach Anwendung und Hersteller werden auch andere Definitionen verwendet. Für PA- oder Studiolautsprecher etwa sind auch die -6 dB Eckwerte bezogen auf den Mittelwert zwischen 100 Hz und 10 kHz gebräuchlich (siehe auch Abb. 8).

Ein weiteres Kriterium ist der durch den Wandler übertragbare Dynamikbereich. Er ist nach oben durch die Eingangsspannung begrenzt, die der Lautsprecher ohne thermische oder mechanische Beschädigungen verarbeiten kann. Thermische Überlastungen entstehen durch die elektrische Verlustleistung in der Schwingspule, wo nahezu die gesamte zugeführte Verstärkerleistung in Wärme umgesetzt wird und zu einer Erhitzung der Schwingspule, des Spulenträgers, der Magneten und des Korbs führt. Mechanische Überlastungen entstehen durch elektrische Signalspitzen, die gerissene Membranen und Aufhängungen oder abgerissene Schwingspulen zur Folge haben können. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass der Treiber

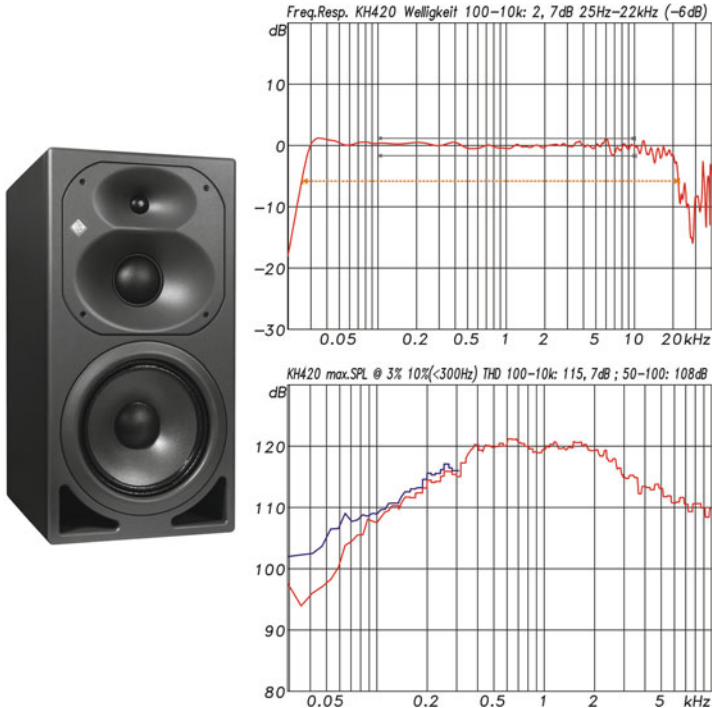


Abb. 8 Links: Drei-Wege-Studiolautsprecher mit Tief-, Mittel- und Hochtoner. Rechts oben: Frequenzgang normiert auf 0 dB für den Mittelwert zwischen 100 Hz und 10 kHz. Die darauf bezogenen Eckfrequenzen (-6 dB) liegen bei 25 Hz und 22 kHz. Die Welligkeit im Frequenzgang zwischen 100 Hz und 10 kHz beträgt 2,7 dB vom Minimum zum Maximum. Die Darstellung ist nicht geglättet. Rechts unten: Erreichbarer maximaler Schalldruckpegel bezogen auf 1 m Entfernung im Freifeld für höchsten 3 % Klirrfaktor (THD, rote Kurve) und höchsten 10 % Klirrfaktor (blaue Kurve) gemessen bis 300 Hz

durch die Frequenzweiche vor Signalen geschützt wird, die nicht im designierten Frequenzbereich liegen und das System beschädigen können. Vom Hersteller anzugeben ist die elektrische Spannung eines Rauschsignals, welches in seiner spektralen Verteilung der Verteilung von Sprache und Musik nachempfunden ist (Simuliertes Programmsignal nach DIN IEC 268-1), und das durch den Lautsprecher noch zerstörungsfrei wiedergegeben werden kann.

Für den praktischen Betrieb mindestens ebenso wichtig ist der Schalldruck, den der Lautsprecher gerade noch verzerrungsfrei übertragen kann. Hier können unterschiedlich strenge Grenzwerte angesetzt werden, z. B. mit einem zulässigen Klirrfaktor von 3 % oder 10 % (s. Abb. 8 rechts unten). Für anspruchsvolle Anwendung (Studiomonitore) haben sich Grenzwerte von 3 % für den gesamten Frequenzbereich und 10 % für den Tieftonbereich etabliert. Diese Werte erscheinen auf den ersten Blick hoch in Relation zu Verzerrungswerten moderner Verstärker und Mischpulte, die meist unterhalb von 0,1 % liegen, sind jedoch für Lautsprecher bereits als

strenges Kriterium aufzufassen. Insbesondere Kompressionstreiber erreichen häufig bei nur 1 W Eingangsleistung schon Verzerrungswerte von 3 % oder mehr.

Ein drittes technisches Kriterium ist die Richtcharakteristik des Lautsprechers. Sie kann durch unterschiedliche Darstellungsweisen und unterschiedliche Maßzahlen beschrieben werden. Eine vollständige Beschreibung der Richtwirkung erlaubt der *Richtfaktor* $\Gamma(\vartheta, \varphi)$. Er gibt den Schalldruck in durch den Winkel φ in der Horizontalen und ϑ in der Vertikalen gegebenen Richtungen an, bezogen auf den Schalldruck in Richtung der maximalen Schallabstrahlung oder der Symmetrieachse des Lautsprechers (φ_0, ϑ_0).

$$\Gamma(\vartheta, \varphi) = \frac{p(\vartheta, \varphi)}{p(\vartheta_0, \varphi_0)}$$

Angegeben wird meist der Logarithmus dieses Werts, das sog. *Richtungsmaß* D mit:

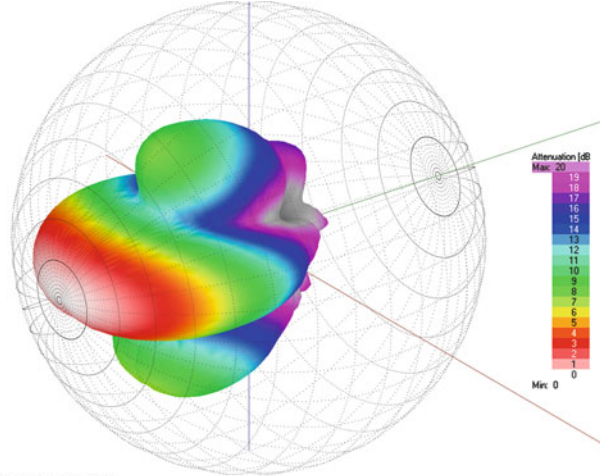
$$D(\vartheta, \varphi) = 20 \log \Gamma(\vartheta, \varphi)$$

Diese Werte können tabellarisch angegeben oder als sog. Balloon für eine bestimmte Frequenz dreidimensional dargestellt werden (Abb. 9, oben). Um das Richtverhalten nur in einer Ebene anzugeben, eignet sich eine sog. Isobarendarstellung, in der die Winkel markiert sind, bei denen der abgestrahlte Schalldruck um bestimmte Werte (z. B. -3 dB, -6 dB, ...) gegenüber der 0°-Richtung abfällt. Dies lässt sich auch frequenzabhängig darstellen. Als *Abstrahlwinkel* des Lautsprechers soll nach DIN EN 60268-5 der Winkelbereich zwischen den -10 dB-Isobaren angegeben werden. Von Seiten der Hersteller wird jedoch häufig auch der Winkelbereich zwischen den -6 dB-Isobaren bestimmt und im Datenblatt des Lautsprechers angegeben.

Als Einzahlwert für die Richtwirkung eines Lautsprechers kann der Bündelungsgrad γ verwendet werden. Er gibt das Verhältnis der Schalleistung einer fiktiven omnidirektionalen Schallquelle, deren allseitig gleicher Schalldruck gleich dem Schalldruck des realen Strahlers in Hauptabstrahlrichtung ist, zur Schalleistung des realen Schallstrahlers an. Für einen ungerichteten Strahler wäre also $\gamma = 1$, mit zunehmender Bündelung nimmt der Bündelungsgrad größere Werte an.

Messverfahren und messtechnische Parameter für Lautsprecher sind nach DIN EN 60268-5 spezifiziert. Aktuelle Entwicklungen in der Lautsprecherentwicklung betreffen weniger die Physik des Wandlers selbst als die vorgeschaltete Elektronik, insbesondere die Erweiterung der passiven Frequenzweiche zu einer aktiven, digitalen Vorverarbeitungsstufe (Controller). Im Bereich der Beschallungstechnik erlauben digitale Filter nicht nur (wie bei einzelnen Lautsprechern) eine Linearisierung des Frequenzgangs, sondern beim Betrieb von Lautsprecher-Arrays auch eine Steuerung der Richtcharakteristik, d. h. ein elektronisches Schwenken der Hauptabstrahlrichtung, eine Bündelung auf die zu versorgende Publikumsfläche und eine möglichst geringe Abstrahlung in darüber hinaus gehende Bereiche (Abb. 10). Diese Verfahren werden bei Line-Arrays und vor allem auch bei DSP-gesteuerten Lautsprecherzeilen erfolgreich eingesetzt (Abb. 11). Mit wenigen großen Zeilen können so auch akustisch schwierige Räume gut beschallt werden, da durch die Länge der Zeilen die Richtwirkung bis zu den tiefen Frequenzen hin wirksam ist und

Source: CA-1001.7
 Measurement: 420
 Measurement Data
 File Path:
 File: 1001.7



ISO 420 / 420E Ref. / ISO 1181-07 / Audio & Acoustics Consulting Ing. Armin Damm

Source Data: F:\Sound&Recording\KH-420\ITA-Mess\Isobaren\STEP-HOR.POX

Copyright by Four-Audio GmbH & Co KG Licensed to AAC

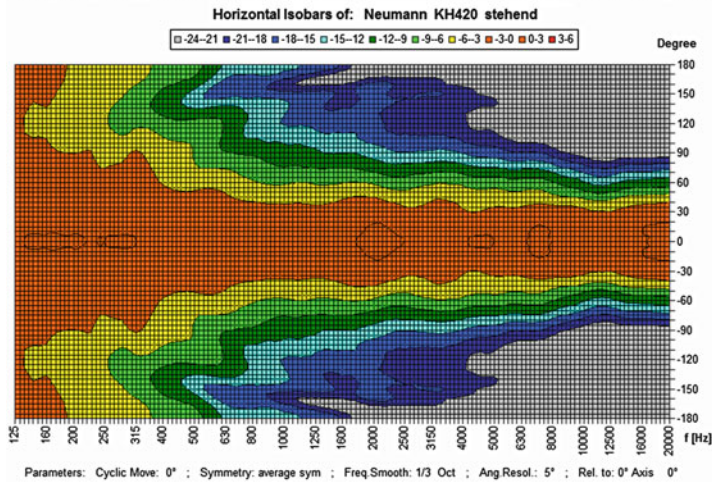


Abb. 9 Zwei Darstellungen der Richtcharakteristik von Lautsprechern. oben: Dreidimensionale Darstellung („Balloon“) für das Richtungsmaß in dB in alle horizontalen und vertikalen Abstrahlrichtungen, bezogen auf die Hauptabstrahlrichtung (0 dB). unten: Isobarenkurve in der Horizontalebene. Dargestellt ist der Winkel, bei dem der abgestrahlte Schalldruck um bestimmte Werte (-3 dB, -6 dB, ...) gegenüber der 0°-Richtung abfällt, in Abhängigkeit von der Frequenz f . Als *Abstrahlwinkel* des Lautsprechers wird der Winkelbereich zwischen den -10 dB- oder zwischen den -6 dB-Isobaren angegeben (Übergang von dunkelgrün nach hellblau). Im vorliegenden Fall liegt der Abstrahlwinkel zwischen 1 kHz und 12 kHz bei etwa 60°. Unterhalb von 200 Hz strahlt der Lautsprecher praktisch ungerichtet ab

durch die elektronische Filterung eine optimale Anpassung der Richtcharakteristik (Beamforming) an die Zuhörerflächen möglich wird. Das Beamforming kann zudem auf Knopfdruck verändert und somit einfach an wechselnde Verhältnisse angepasst werden (Abb. 12).

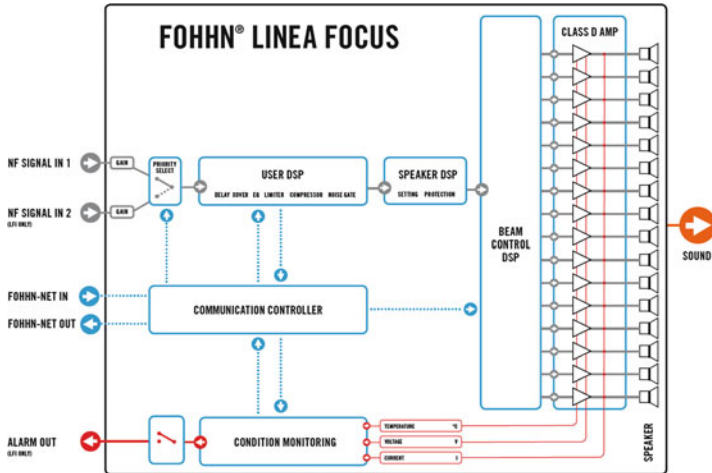


Abb. 10 Blockschaltbild für einen DSP-gesteuerten Zeilenlautsprecher. Jeder Lautsprecher in der Zeile hat eine eigene Endstufe und eigene Filter. Die Gesamtheit aller Filter ermöglicht eine elektronische Steuerung der Richtcharakteristik (Beamforming). (Quelle: Fohhn)

Abb. 11 Eine DSP-gesteuerte Lautsprecherzeile im Kölner Hauptbahnhof zur Beschallung der Eingangshalle. Die 5 m langen Zeilen ermöglichen Reichweiten von bis zu 50 m mit guter Sprachverständlichkeit auch in einer Umgebung mit starkem Nachhall



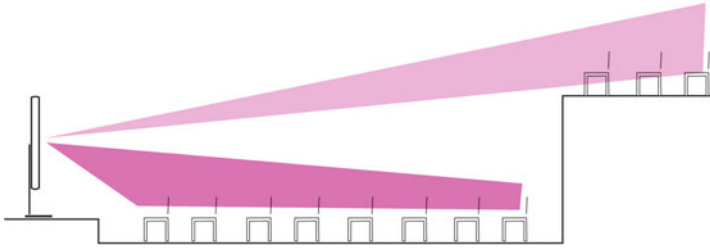


Abb. 12 Beamforming mit einer DSP Zeile für zwei Hörerflächen. (Quelle: Fohhn)

2 Wiedergabeverfahren und Beschallungstechnik

2.1 Monofone Wiedergabe und Schallfeld im Raum

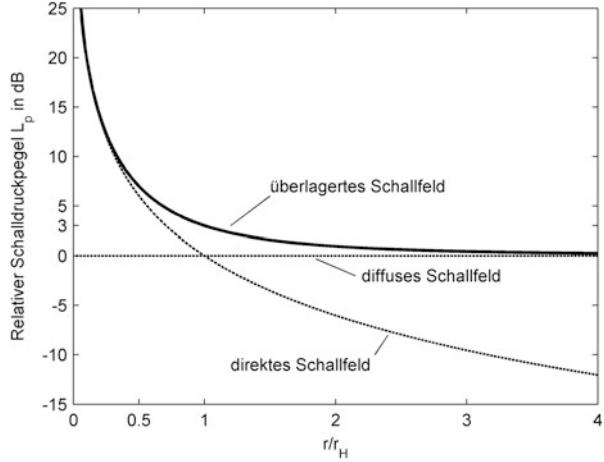
Bei monofoner Wiedergabe wird *ein* Audiosignal durch *einen* Lautsprecher wiedergegeben. In diesem Fall, wie er in der Praxis etwa bei Telefonen, kleinen Mediensystemen (Abb. 4) oder einfachen Beschallungssystemen für Sprachdurchsagen (Abb. 6) auftritt, wird der Lautsprecher mit seinem Abstrahlverhalten (Schallleistung, Frequenzgang, Richtcharakteristik) selbst als Schallquelle mit definierter Position wahrgenommen. Analog zum Verhalten einer natürlichen akustischen Schallquelle verändert sich das bei einem Hörer empfangene Schallfeld mit den Eigenschaften des umgebenden Raums und der Entfernung von der Quelle, was sich bei monofoner Wiedergabe besonders einfach beschreiben lässt.

Um das Verhalten eines Lautsprechers im Raum zu modellieren, lässt sich das Schallfeld zunächst in ein Direktfeld (Freifeld) und einen räumlichen Anteil (Dif-fusfeld) trennen. Das Direktfeld enthält nur den vom Lautsprecher abgestrahlten Schall, während der räumliche Anteil die Gesamtheit des von den Wänden (einfach und mehrfach) reflektierten Schalls enthält. Im Freifeld breitet sich eine Schallwelle mit einer durch die Richtcharakteristik beschriebenen Ortsabhängigkeit in alle Abstrahlrichtungen aus. Die meisten realen Schallquellen verhalten sich näherungs-weise wie idealisierte Punktquellen, welche ein Schallfeld mit sphärischen Wellen-fronten abstrahlen. Aus Gründen der Energieerhaltung muss der Schalldruck p auf den konzentrisch sich nach vergrößernden Wellenfronten mit

$$p = \frac{1}{r}$$

in Abhängigkeit vom Abstand r abnehmen. Mit jeder Verdopplung des Abstands wird der Schalldruck somit um die Hälfte geringer, entsprechend sinkt der Schalldruckpegel um 6 dB.

Abb. 13 Schalldruckpegel im Raum in Abhängigkeit von der Entfernung r zwischen Hörer und Schallquelle. Innerhalb des Hallradius r_H überwiegt das direkte Schallfeld, jenseits des Hallradius überwiegen die im zugrunde gelegten Modell vereinfachend als perfekt diffus angenommenen räumlichen Schallanteile



Für den räumlichen Anteil lässt sich idealisiert annehmen, dass – spätestens nach einer ausreichenden Anzahl von Reflexionen – die Schallwellen im Hinblick auf ihre Ausbreitungsrichtung und ihre Energieverteilung im Raum weitgehend perfekt durchmischt sind. Diesen Zustand bezeichnet man als *diffuses Schallfeld*. Im diffusen Schallfeld ist die Schallenergie im Raum überall gleich, es gibt also keine Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle mehr.

Betrachtet man das gesamte Schallfeld nun als Überlagerung des direkten und diffusen Anteils, ergibt sich ein Verlauf wie in Abb. 13 skizziert. Während in unmittelbarer Nähe der Schallquelle der direkte Anteil überwiegt und der Schalldruckpegel mit 6 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt, ist der Diffusfeldpegel überall im Raum konstant. In einer bestimmten Entfernung von der Quelle halten sich der direkte und der diffuse Schallanteil die Waage. Für den Fall omnidirektionaler Schallabstrahlung ist diese Entfernung in alle Richtung gleich groß und wird als *Hallradius* bezeichnet. Der Hallradius r_H hängt nach der Formel

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

vom Volumen V und von der Nachhallzeit T des Raums ab, da beide Größen maßgeblich für die Intensität des diffusen Schallfelds sind. Jenseits des Hallradius nimmt der Schalldruck kaum noch ab, da der Anteil der diffusen Schallenergie überwiegt. Für gerichtete Schallquellen ist die Entfernung, bei der sich Direkt- und Diffusfeld die Waage halten, nicht mehr kreisförmig um die Quelle angeordnet, sondern vergrößert sich in Richtung bevorzugter Abstrahlung. Sie wird dann als Hallabstand r_R bezeichnet, und es gilt

$$r_R = \Gamma(\vartheta, \varphi) \cdot \sqrt{\gamma} \cdot r_H,$$

wobei γ den Bündelungsgrad und $\Gamma(\vartheta, \varphi)$ den Richtungsfaktor der Schallquelle in Abhängigkeit von den Winkeln ϑ und φ angibt (s. Abschn. 1.4).

Im Hinblick auf den räumlichen Anteil des Schallfelds seien zwei typische Situationen betrachtet:

A. Für einen typischen Beschallungslautsprecher ($\gamma = 3$) in einer typischen Mehrzweckhalle ($V = 10.000 \text{ m}^3$, $T = 1,5 \text{ s}$) ergibt sich, ausgehend von diesen Zusammenhängen, der Hallabstand bei mittleren Frequenzen ($f = 500 \text{ Hz}$) zu $r_H \approx 8 \text{ m}$.

B. Für einen typischen Studiolausprecher ($\gamma = 2$) in einem typischen Regieraum ($V = 100 \text{ m}^3$, $T = 0,25 \text{ s}$) ergibt sich ein Hallabstand von $r_H \approx 1,6 \text{ m}$.

In beiden Fällen wird deutlich, dass sich ein Großteil des Publikums in einer Beschaltungssituation ebenso wie der Referenz-Hörerplatz des Tonmeisters im Studio an der Grenze oder außerhalb des Hallabstands befinden. Für die Einrichtung einer optimalen Übertragung zum Hörerplatz genügt es also nicht, nur die Eigenschaften der Lautsprecher zu betrachten. Auch die Eigenschaften des Raums spielen in einer elektroakustischen Wiedergabesituation eine wesentliche Rolle und müssen auch bei der Konfiguration des Lautsprechersystems mitberücksichtigt werden. Dies geschieht z. B. dadurch, dass die Lautsprecher, z. B. durch einen digitalen Controller (s. Abschn. 1.3), so entzerrt werden, dass sich an einem bevorzugten Hörerplatz oder (bei größeren Publikumsflächen) im Mittel über eine ausgedehnte Hörerfläche ein gewünschter Frequenzgang der Lautsprecher einstellt.² Im Tonstudio geschieht dies durch Ermittlung der *Betriebsschallpegelkurve* am Regieplatz gemäß EBU Tech. 3276 und SSF-01.1. Hierfür werden die Lautsprecher mit rosa Rauschen angeregt und so entzerrt, dass sich am Hörerplatz eine Abweichung von nicht mehr als $\pm 3 \text{ dB}$ im Spektrum ergibt.³

2.2 Stereofone Wiedergabe

Für die elektroakustische Darstellung ausgedehnter oder räumlich verteilter Schallquellen wird auch in der Beschallungstechnik häufig ein stereofoner Ansatz gewählt. Bei diesem aus der stereofonen Tonträgerproduktion entlehnten Verfahren werden Lautsprecherpaare mit weitgehend identischen, sich nur um eine gewisse Zeit- oder Pegeldifferenz voneinander unterscheidenden Signalpaaren angesteuert. In Abhängigkeit von dieser Signaldifferenz bildet sich bei der Wiedergabe dann eine virtuelle Schallquelle (*Phantomschallquelle*), die auf der Basis zwischen den Lautsprechern lokalisiert wird. Für einen in der Symmetrieachse der Lautsprecher (sweet spot) befindlichen Hörer resultiert die genaue Position aus der Laufzeit- oder Pegeldifferenz des stereofonen Signalpaars (Abb. 14), oder aus einer Überlagerung beider Parameter.

Die für eine stereofone Abbildung erforderlichen Laufzeit- und Pegeldifferenzen können entweder durch ein stereofones Aufnahmesystem, in der Regel ein geeignet

²Ahnert und Goertz 2008, S. 522 ff.

³Maier 2008, S. 195 ff.

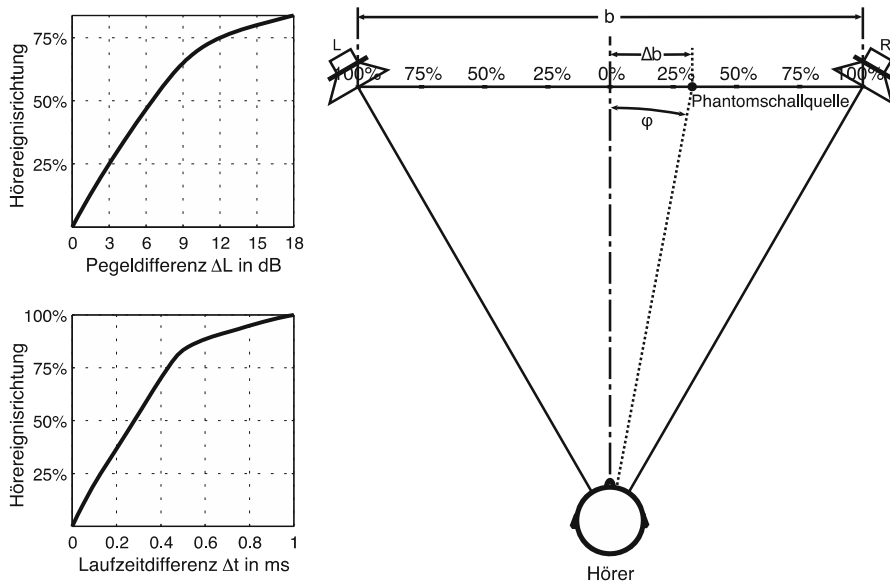


Abb. 14 Zweikanalstereofone Lautsprecheranordnung. Bei der Wiedergabe stereofoner Signale bildet sich eine sog. Phantomschallquelle, deren scheinbare Position auf der Lautsprecherbasis von der Pegel- und Laufzeitdifferenz abhängt, mit der die Klangquelle innerhalb des stereofonen Signalpaares codiert ist. (Werte nach Wendt 1964)

ausgerichtetes Mikrofonpaar, erzeugt werden, oder durch ein sog. Panorama-Potenzimeter, das ein monofones Eingangssignal am Mischpult mit einer regelbaren Pegeldifferenz auf den stereofonen Ausgangskanal verteilt. Auf diese Weise können Schallquellen akustisch auf der Stereobasis positioniert und das räumliche Abbild eines ausgedehnten Ensembles von Klangquellen erzeugt werden.⁴

Medial produzierte Musik (auf CD, LP oder zweikanaligen Dateiformaten) liegt in der Regel in diesem Format vor. Auch bei Live-Beschallungen werden die links und rechts von der Bühne angebrachten Lautsprecher zumindest ansatzweise für eine stereofone Abbildung verwendet, auch wenn sich der Großteil des Publikums außerhalb eines sweet spots befindet und die Lokalisation daher weniger gut kontrollierbar ist. Mehrkanalig produzierte Musik, etwa im 5.1-Format auf DVD, verwendet eine erweiterte Form der Stereophonie, bei der meist nur die äußeren Kanäle (L, R) für die räumliche Abbildung des Ensembles (Orchester, Kammermusik-Formation, Chor) eingesetzt werden, während der Mittenkanal (C) für die Abbildung von Einzelquellen (Sprecher, Sänger, Instrumentalsolisten) und die rückwärtigen Surround-Kanäle (LS, RS) für räumliche Schallanteile verwendet werden. Zur Nomenklatur und zur Lautsprecherkonfiguration mehrkanaliger Verfahren siehe Abschn. 2.3.

⁴Weinzierl 2008.

2.3 Mehrkanalstereofonie und Filmtton

Die Mehrkanalstereofonie arbeitet, ebenso wie die zweikanalige Variante, mit der Ausbildung von Phantomschallquellen zwischen Lautsprecherpaaren, versucht jedoch gleichzeitig, die Beschränkungen auf ein enges, zweikanaliges Stereopanorama zu umgehen und den Hörer allseitig mit Klang zu umgeben (Surround Sound). Konventionelle Surroundsysteme nutzen die Horizontalebene für die Aufstellung der Lautsprecher, einige neuere Verfahren nutzen zusätzlich auch Lautsprecher an der Decke, am Boden oder an anderen Punkten im Raum.

Mehrkanalige Wiedergabeverfahren verwenden unterschiedliche Kanalkonfigurationen, die von 3.0 bis 11.2 oder noch weiter reichen. Die Zahl vor dem Punkt definiert dabei die Anzahl der Breitband-Kanäle (Fullrange Channels), die Zahl nach dem Punkt gibt die Anzahl der bandbegrenzten Tiefbass-Effektkanäle an. 5.1 bedeutet also: Fünf Breitbandkanäle und ein Tiefbass-Effektkanal (Low Frequency Effects, LFE).

Die meisten mehrkanaligen Wiedergabeverfahren sind von den Filmttonstandards inspiriert, vor allem von Dolby Stereo, das Mitte der 1970er-Jahre mit Filmen wie *A Star Is Born* (1976) und *Star Wars* (1977) eingeführt wurde. Es handelt sich um ein 4.0-Format, bei dem zwei Stereolautsprecher (L, R) durch einen Center-Lautsprecher (C) und eine Reihe seitlicher und rückwärtiger Lautsprecher für den Surround-Kanal (S) ergänzt sind (Abb. 15). Im Filmtton ist der Center-Kanal für bildbezogene Sprachdialoge reserviert und stellt sicher, dass – unabhängig vom Hörerplatz im Kino – die Dialoge akustisch stets im Zentrum der Leinwand lokalisiert werden. Der Surroundkanal ist prädestiniert für Geräusch-Effekte, die keinen unmittelbaren Bildbezug aufweisen.

Im Zeitalter analoger Tonträger wurden mehrkanalige Formate meist mit Hilfe einer sog. Matrizierung auf zweikanaligen Tonträgern gespeichert (Dolby Stereo 4.0 auf einer zweikanaligen Lichtton-Spur, Quadrofonie-Schallplatten auf einer zweikanaligen Vinyl-Rille, zur Technik der Matrizierung⁵). Mit Einführung der Digitaltechnik wurden Datenformate wie MPEG-1, MPEG-2 oder Dolby Digital entwickelt, die das mehrkanalige Signal, meist gemeinsam mit dem Bildsignal, in einem einzigen digitalen Datenstrom codieren und dabei datenreduzierende Codecs verwenden, die auf einer informationstheoretischen Redundanz des Signals (verlustlose Codierung) sowie auf einem Verzicht auf kaum oder nicht hörbare Signalanteile beruhen (psychoakustische, verlustbehaftete Codierung). Nach der Einführung des Digitaltons im Kino Mitte der 1990er-Jahre wurden diese Daten zunächst als Pixelmatrix neben dem Bild auf der Filmrolle (Dolby Digital, SDDS) oder auf einer synchron zur Filmrolle abgespielten CD-ROM (DTS) gespeichert (Tab. 1). Innerhalb der letzten 10 Jahre haben die meisten Kinobetreiber weltweit im Rahmen der Umstellung auf Digital Cinema die Verwendung von Filmrollen durch digitale Verfahren ersetzt, bei denen sowohl Bild- als auch Ton-Daten von einer Festplatte ausgelesen und durch Digitalprojektoren wiedergegeben werden.

⁵Slavik und Weinzierl 2008.

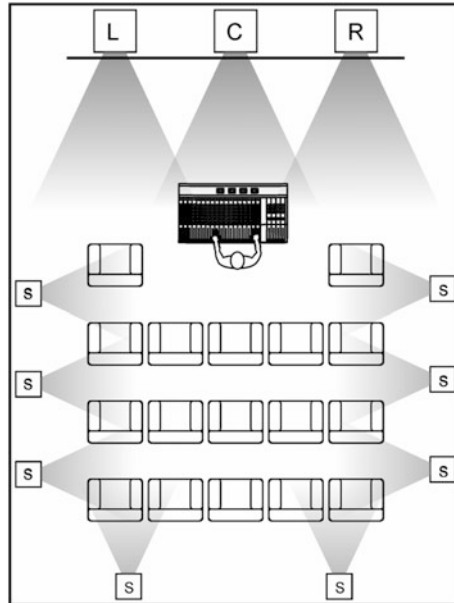


Abb. 15 Lautsprecheranordnung in der Filmtonregie. Bei der Wiedergabe von älteren Filmen mit Mono-Tonspur (1.0) wird nur der Dialog-Kanal angesprochen (C). Die Wiedergabe stereofoner Filme (2.0) erfolgt über die Lautsprecher L und R hinter der Leinwand, bei der Wiedergabe mehrkanaliger Formate werden sowohl die Frontkanäle (L,C,R) als auch die Surround-Lautsprecher (S) aktiviert. Bei 4.0 werden diese einem gemeinsamen Monosignal versorgt. Erst bei der Wiedergabe von 5.1 werden die Surroundkanäle in Stereo betrieben (Left Surround, Right Surround). Bei 6.1 werden zusätzliche Lautsprecher für den Back Surround (BS) oder Rear Center Channel an der Rückwand des Kinos angebracht

Tab. 1 Mögliche Kanalkonfigurationen verschiedener Filmton-Verfahren

Verfahren	Einführung	Kanalkonfiguration
Lichtton Mono	1920er-Jahre	1.0
Dolby Stereo Lichtton	1976	2.0, 4.0
Dolby Digital	1992	1.0–5.1
Digital Theater Systems (DTS)	1993	5.1, 6.1
Sony Dynamic Digital Sound (SDDS)	1993	7.1

Im Heimbereich hat sich neben der nach wie vor vorherrschenden Zweikanalstereofonie das 5.1-Format etabliert, wie es etwa auf dem DVD-Video in Form eines im Dolby Digital oder im MPEG-2 Format codierten Signals verfügbar ist. Analog zur Kanalkonfiguration im Kino (Abb. 15) enthält es drei Frontkanäle (L,C,R), zwei Surround-Kanäle (LS,RS) und einen tieffrequenten Effektkanal (LFE). In Abhängigkeit von der verfügbaren Wiedergabeanlage erlauben digitale Dekoder einen Downmix, bei dem etwa der Dialog-Kanal für eine zweikanalige Anlage zu gleichen Teilen auf die stereofonen Frontkanäle (L,R) verteilt wird.

2.4 Bühnenbeschallung für Live-Events

Die primäre Aufgabe einer Beschallungsanlage für Live-Events ist es, Musik oder Sprache in angemessener Lautstärke und möglichst gleichmäßig auf dem gesamten Publikumsbereich wiederzugeben, ohne dass störende Inkonsistenzen zwischen visuellem und akustischem Eindruck entstehen, etwa im Hinblick auf die Zeitsynchronität oder die Lokalisation der Klangquellen.

In der Frage der angemessenen Lautstärke können bestimmte Konventionen, die Präferenz des für die Mischung verantwortlichen Tonmeisters, die (mutmaßlichen) Erwartungen des Publikums, bis hin zu rechtlichen Rahmenbedingungen eine Rolle spielen. Für Sprache etwa wird in der Regel ein Wiedergabepegel von 65 dB SPL als natürlich empfunden. Voraussetzung dafür ist allerdings eine ruhige Umgebung. In einer gestörten Umgebung muss der Nutzsignalpegel mindesten 6–10 dB über dem Störpegel liegen, um eine ausreichende Sprachverständlichkeit zu gewährleisten. Bei klassischer Musik orientiert man sich an dem Schallpegel, der für ein vergleichbares Ensemble in einem Konzertsaal erwartet werden könnte. Er bewegt sich bei symphonischen Konzerten in großer Besetzung typischerweise in einem Bereich von 45–95 dB am Hörerplatz.⁶ Bei elektronischer Musik wäre weniger von einer natürlichen als von einer angemessenen Lautstärke zu sprechen. Sie kann von Jazz-Konzerten mit Pegeln in der Größenordnung von 80–85 dB(A) bis hin zu 100–105 dB(A) bei modernen Techno-Tanzveranstaltungen reichen. Bei Rockkonzerten aus der Hardrock- und Punk-Szene wurden auch Schallpegel von 114 dB(A) gemessen, die kaum noch als sinnvoll betrachtet werden können, da sich ein Großteil der Zuhörer mit Gehörschützern ins Konzert begeben muss, um sich vor dieser Lärmexposition zu schützen. Bei hohen Schallpegeln setzt sich der Veranstalter, der für Gefährdungen haftet, die aus dem Betrieb der Beschallungsanlage resultieren, dem Risiko einer Schadensersatzklage aufgrund von Gehörschäden aus. Nach gängiger Rechtsprechung kommt der Veranstalter seiner sog. Verkehrssicherungspflicht nach, wenn er die Schallimmission im Publikum nach DIN 15905–5 messtechnisch kontrolliert und die dort empfohlenen Grenzwerte für einen mittleren Schallpegel von 99 dBA (Mittlungsdauer 30 Minuten), mit kurzzeitig erlaubten Spitzen von bis zu 135 dB, nicht überschreitet (Abb. 16).

Eine gleichmäßige Beschallung ausgedehnter Publikumsflächen lässt sich einerseits durch eine Kombination von verschiedenen Lautsprechersystemen für unterschiedliche Segmente der Hörerfläche erreichen (Abb. 17); sehr populär wurde in den letzten Jahren auch die Verwendung von Line Array Systemen, die durch ihre Abstrahleigenschaften und durch ihre elektronische Konfiguration auch über größere Entfernungen eine homogene Schallpegelverteilung ermöglichen (vgl. Abschn. 1.3).

Bei der Abstrahlung eines Schallsignals über eine Kombination verschiedener, räumlich verteilter Lautsprecher bestimmt die an einem Hörerplatz zuerst eintreffende Wellenfront den akustischen Richtungseindruck (Präzedenzeffekt, Gesetz der ersten Wellenfront). Aus diesem Grund muss für die Beschallungsanlage mit Verzögerungsgliedern (Delays) gearbeitet werden, um zu gewährleisten, dass an allen

⁶Winckel 1962.

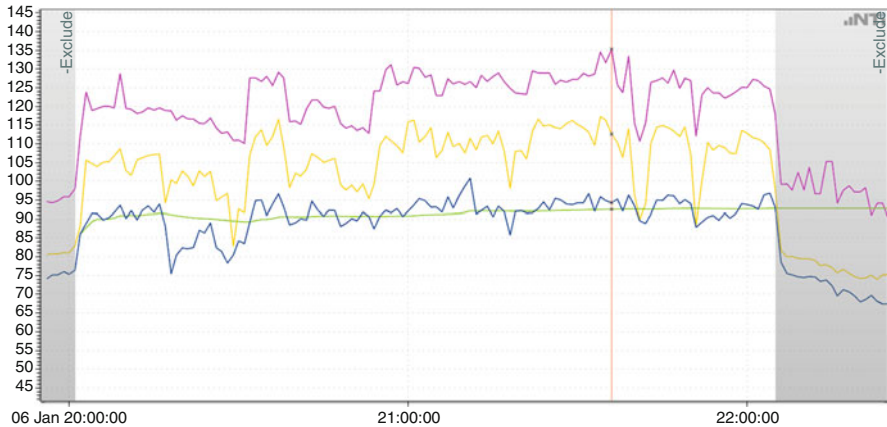


Abb. 16 Pegelverlauf während eines Konzertes in der Neuen Nationalgalerie Berlin Anfang 2015. Blau: A-bewerteter Pegelverlauf, gelb Z-bewerteter (Frequenz-linearer) Pegelverlauf, rosa: Spitzenpegel, grün: Mittelungspegel über den gesamten Zeitraum

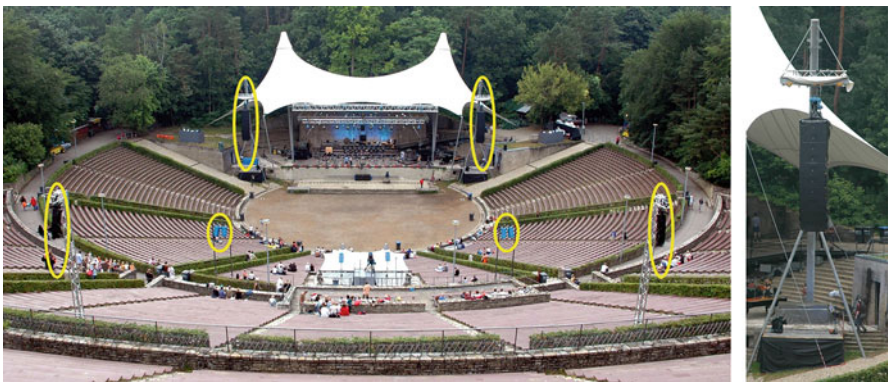


Abb. 17 Beschallungsanlage für ein Open Air Konzert (Waldbühne, Berlin). Links und rechts neben der Bühne zwei Line Array Systeme als Hauptlautsprecher (mit Ausschnittvergrößerung rechts). Zwischen den Publikumsblöcken befinden sich Stützlautsprecher für die weiter entfernten, oberen Reihen

Hörerplätzen das primäre Schallsignal aus der Richtung der Bühne eintrifft. Eine technische Herausforderung liegt auch in der Vermeidung von Rückkopplungen, die dadurch entstehen, dass die Lautsprechersignale von den Mikrofonen auf der Bühne erneut aufgenommen werden und ein Regelkreis mit positivem Feedback entsteht. Dies lässt sich vermeiden, indem durch den Einsatz der Richtcharakteristik von Mikrofonen und Lautsprechern die Dämpfung im Feedback-Übertragungsweg

möglichst hoch eingestellt wird. Durch Filter und elektronische Frequenzverschieber lässt sich die Feedback-Schwelle zusätzlich anheben.⁷

Zur Frage der Schallpegel sei ergänzend bemerkt, dass für die Genehmigung der Veranstaltung auch die Schallimmission außerhalb des Publikums, also etwa in Wohngebieten in der unmittelbaren Nachbarschaft maßgeblich ist. Hier gelten die Grenzwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), als Allgemeine Verwaltungsvorschrift im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Grenzwerte sind Beurteilungspegel, die – je nach Charakter der betroffenen Fläche – zwischen 70 dBA für Industriegebiete und 35 dBA für Kurgebiete nach 22 Uhr liegen.⁸ Die Pegelwerte beziehen sich auf Immissionsorte außerhalb von Gebäuden und sind als Mittelungspegel mit möglichen Zuschlägen für Impuls-, Ton- und Informationshaltigkeit zu bestimmen. Tagsüber wird der Beurteilungspegel über 16 Stunden (6:00 bis 22:00 Uhr) und nachts über die lauteste Stunde gebildet.

2.5 Beschallung großer öffentlicher Räume

Für Beschallungsanlagen in großen öffentlichen Räumen wie Bahnhofshallen und Flughäfen, aber auch Sport- und Versammlungsstätten gelten, neben der allgemeinen Erwartung an eine gute Klangqualität, strenge Vorgaben an die zu erreichende Sprachverständlichkeit, da die Anlagen in der Regel auch für Alarm- und sonstige Sprachdurchsagen eingesetzt werden. Die einschlägigen Normen ([DIN EN 60849](#), [DIN VDE 0833-4](#)) sehen als technisches Kriterium hierfür den *Speech Transmission Index* (STI) vor. Er misst die Beeinträchtigung der Modulationstiefe von Sprachsignalen durch Faktoren wie Störgeräusche aller Art, raumakustische Faktoren wie Nachhall und Echos, die Lautsprecheranlage selbst mit ihren Eigenschaften wie Bandbreite, Verzerrungen, Dynamikkompression etc. sowie einige psychoakustische Aspekte wie die Hörschwelle und den Verdeckungseffekt (Abb. 18). All diese Faktoren gehen in die Messung und Berechnung des STI-Wertes ein.

Testsignal ist Oktavbandrauschen mit den für Sprache relevanten sieben Frequenzbändern von 125 Hz bis 8 kHz und einer für Sprache typischen Modulation von 0,63 Hz bis 12,5 Hz. Dieses Signal wird über die zu beurteilende Übertragungsstrecke geschickt und anschließend der Modulationsverlust ausgewertet.

Daraus entsteht eine Matrix der sog. Modulationsindizes m_k , für das Oktavband k und die Modulationsfrequenz f , mit Werten zwischen 0 und 1. Diese insgesamt 98 Indizes werden mit unterschiedlicher Gewichtung in einen STI-Wert übergeführt, der ebenfalls zwischen 0 und 1 liegen kann. Den Zusammenhang der so bestimmten STI-Werte mit empirisch bestimmten Maßen für die Silben-, Wort- und Satzverständlichkeit zeigt Tab. 2.

Die Einhaltung des Standards für Sprachalarmierungsanlagen ([VDE 0833-4](#)) erfordert einen STI-Wert, der für einen Großteil der relevanten Bereiche einen Wert

⁷Ahnert und Goertz 2008, S. 504 ff.

⁸Jarass 2015.

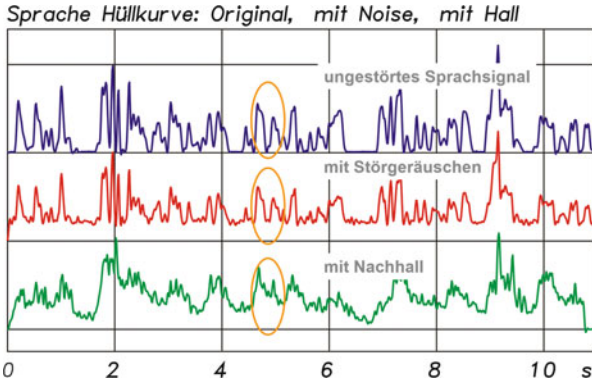


Abb. 18 Hüllkurve einer Sprachsequenzen, wie sie in einer störungs- und nachhallfreien Umgebung aufgenommen wurde (oben). Die hier vorhandene Modulationstiefe wird zu 100 % definiert. Wird dieses Sprachsignal in einem Raum mit Nachhall und Störgeräuschen wiedergegeben, dann verringert sich die Modulationstiefe der Hüllkurve. Dafür kann sowohl ein Störsignal verantwortlich sein, dessen Grundpegel leise Anteile im Sprachsignal verdeckt (Mitte), als auch der Nachhall des Raumes, durch den laute Passagen in der Sprache (Vokale) die nachfolgenden leiseren Anteile (Zischlaute) verdecken und somit die Verständlichkeit herabsetzen (unten)

Tab. 2 Zusammenhang zwischen der Sprachverständlichkeit (Speech Transmission Index, STI) und den Verständlichkeitsraten für Silben, Wortfolgen und Sätze

STI-Wert	Einstufung nach DIN EN 60268	Silbenverständlichkeit in %	Wortverständlichkeit in %	Satzverständlichkeit in %
0...0,3	Schlecht	0...32	0...37	0...75
0,3...0,45	Schwach	32...61	37...68	75...93
0,45...0,6	angemessen	61...85	68...88	93...98
0,6...0,75	Gut	85...98	88...98	98...100
0,75...1	ausgezeichnet	98...100	98...100	100

von 0,5 nicht unterschreiten darf. Insbesondere für raumakustisch schwierige Bereiche mit hohem Störpegel wie die Eingangshallen oder Gleisbereiche großer Bahnhöfe ist dies mit erheblichem Aufwand verbunden (Abb. 19).⁹

Über die reine Anwendung als Sprachalarmanlage hinaus gibt die Norm [DIN EN 60268-16](#) Anhaltspunkte für anzustrebende STI Werte in Abhängigkeit von der Anwendung. Für Konzerthallen und Kirchen wird hier ein Wert von 0,58 empfohlen, für Hörsäle von 0,62 und für Theater und Parlamente von 0,7.

Eine besondere Herausforderung für die Beschallungstechnik stellen Sportstätten dar. Unter schwierigen Randbedingungen mit hohem Störpegel und langem Nachhall gilt es hier zum einen klar verständliche Durchsagen für die Zuschauer zur Information und natürlich für Ansagen im Notfall, z. B. zur Evakuierung des Stadions, möglich zu machen. Die Beschallungsanlage sollte zudem auch die separate Ansprache einzelner

⁹Schmitz et al. 2011.

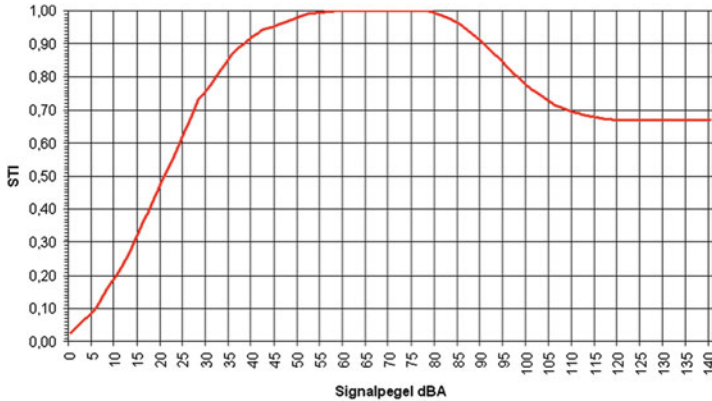


Abb. 19 Abhängigkeit der Sprachverständlichkeit (Speech Transmission Index, STI) vom Pegel des verstärkten Sprachsignals. Bei niedrigen Pegelwerten unter 55 dBA kommt es durch leise Anteile in der Nähe der Hörschwelle zu einer Verschlechterung, ebenso für Werte oberhalb von 80 dBA durch den Effekt der Selbstmaskierung

Sektoren ermöglichen. Über die Anforderung einer verständlichen Sprachwiedergabe hinausgehend, wird meist auch noch die Möglichkeit einer hochwertigen Musikwiedergabe gewünscht, um Werbeeinspielungen, die Vereins hymne, die Torhymne etc. ansprechend und laut einspielen zu können. Aktuelle Messungen in einem Bundesligastadion liefern in der Fan-Kurve einen Mittelungspegel von 100 dBA über 15 Minuten. Die Anforderungen der FIFA gehen sogar von bis zu 107dBA Störpegel aus. Parallel dazu wird ein Alarmierungspegel von 6 bis 10 dB über dem Störpegel gefordert.

Ein wichtiges Werkzeug für die Planung von Beschallungsanlagen sind Simulationsprogramme zur Elektroakustik und Raumakustik. Sie greifen auf die Lautsprecherdaten der jeweiligen Hersteller zu (Pegel, Frequenzgang, Richtcharakteristik) und simulieren die Schallausbreitung in einer durch ein 3D-Modell nachgebildeten Umgebung, wobei das Verhalten der schallreflektierenden Oberflächen durch Absorptions- und Streugrade definiert werden kann (Abb. 20). Mit Hilfe dieser Werkzeuge wird es auch möglich, verschiedene Lautsprechervarianten zu vergleichen und die Eigenschaften der Anlage für unterschiedliche Nutzungsvarianten und Besetzungsgrade zu beurteilen. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die möglichst genaue Anpassung des Computermodells an die realen raumakustischen Verhältnisse, sowie verlässliche Daten der eingesetzten Lautsprechertypen.

Das Beispiel aus Abb. 20 und 21 zeigt eine typische Vorgehensweise bei der Planung. Im ersten Schritt wird die Gleichmäßigkeit des Direktschalls für mittlere und hohe Frequenzen geprüft. Die Berechnung erfolgt mit rosa Rauschen als Anregungssignal. Bei den Ergebnissen ist nur die gleichmäßige Abdeckung auf den Publikumsflächen relevant, nicht jedoch der erreichbare Pegel. Im zweiten Schritt wird mit einem Sprachspektrum gerechnet und der damit erreichbare Maximalpegel bestimmt. Relevant ist auf der akustischen Seite der erreichbare Mittelungspegel. Der dazu korrespondierende Wert auf der elektrischen Seite ist der

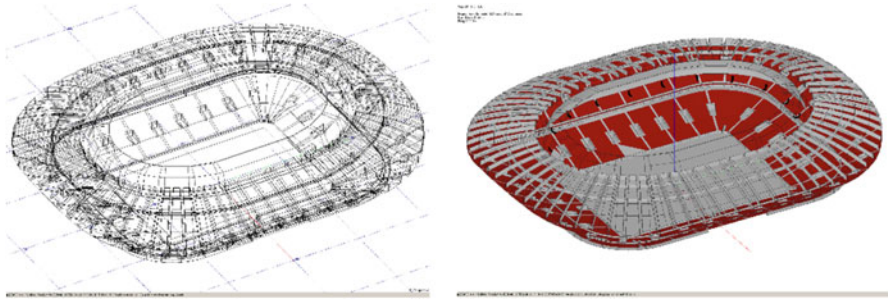


Abb. 20 Drahtgittermodell (links) zur Planung der Beschallungsanlage für ein großes Stadion mit Hilfe eines Simulationsprogramms. Rechts das Modell mit Zuschauerflächen (rot) und Lautsprechern

Leistungswert der Lautsprecher, womit er über einen längeren Zeitraum, ohne Schaden zu nehmen, betrieben werden kann. Ebenfalls mit Sprachspektrum berechnet werden die Werte der Sprachverständlichkeit, die stark vom angenommenen Störpegel des Hintergrundgeräusches abhängen.

2.6 Beschallung in Kraftfahrzeugen

Spezielle Anforderungen werden an Audiosysteme im Automobil gestellt. Das Kraftfahrzeug ist einer der wenigen Orte, an dem Musik in beliebigen Lautstärken gehört werden kann und häufig auf hohe Klangqualität Wert gelegt wird. Die besondere Herausforderung liegt darin, eine auf die spezielle Akustik des Innenraums (starke Schallreflexionen von den Seitenscheiben, stehende Wellen im Innenraum), auf die Hörpositionen der Insassen und auf die von der Fahrsituation abhängigen Eigenschaften des Hintergrundgeräusches angepasste Anlage zu installieren. In diesem Zusammenhang gibt es im Fahrzeug auch die Möglichkeit eine *Geschwindigkeitsabhängige Lautstärkeanpassung* (GALA) zu installieren, oder einzelne Frequenzbänder des Nutzsignals so anzupassen, dass Nebengeräusche maskiert werden.¹⁰

Um ein gewünschtes Klangergebnis zu erzielen, muss jede Ausstattungsvariante eines Fahrzeugs ausgemessen werden (*Acoustic Systems Engineering/ASE*). Ein besonderes Problem in der Beschallung von Kraftfahrzeugen stellt die asymmetrische Platzierung des Hörers vor der Stereoanlage dar. Der ideale Aufenthaltspunkt (*Sweetspot*) wäre das gleichseitige Stereodreieck (der Hörer ist von beiden Lautsprechern gleich weit entfernt). Dies ist im Fahrzeug nicht gegeben, da der Fahrer zu nah am linken Kanal sitzt. Beim Beifahrer ist es umgekehrt. Das Problem kann durch einen Center-Lautsprecher in der Mitte des Armaturenbretts gelöst werden, der verzögerte Anteile vom linken und rechten Kanal enthält. Dadurch entsteht beim Fahrer und Beifahrer jeweils der Eindruck, optimal in einem stereofonen Schallfeld zu sitzen.¹¹

¹⁰Vgl. Meroth und Tolg 2008, S. 64.

¹¹Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hess (Hochschule Heilbronn) für diese Informationen.

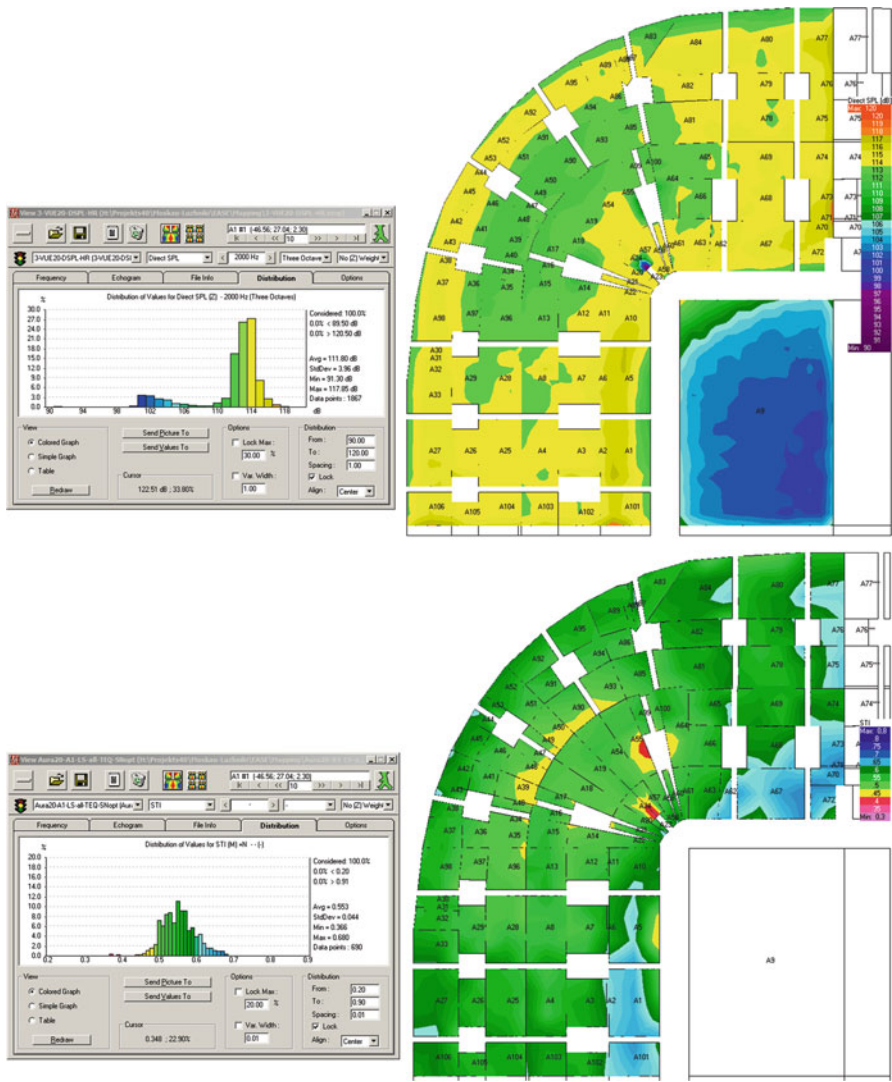


Abb. 21 Oben: Simulierte Verteilung der Direktschallpegel über der Hörerfläche für die drei Oktavbänder von 1, 2 und 4 kHz zur Beurteilung der Homogenität der Beschallung in den bei Sprache besonders wichtigen Frequenzbändern. Unten: Simulierte Sprachverständlichkeit (Speech Transmission Index, STI) für das voll besetzte Stadion bei 107 dBA Störpegel und beim Betrieb aller Lautsprecher. Dargestellt ist jeweils nur ein Quadrant der Zuschauerränge

Mittlerweile werden auch komplexere Systeme entwickelt. Sie reichen von 5.1. Surround (ein Center-Lautsprecher, zwei Türlautsprecher hinten und vorne, sowie ein Subwoofer) bis zu Systemen mit über 50 einzeln ansteuerbaren Lautsprechern. Dabei wird das Prinzip der Wellenfeldsynthese angewandt, mit der sich ein

Audi Q7 WFS

Q7 WFS Systemlayout
Q7 WFS System overview

06/10

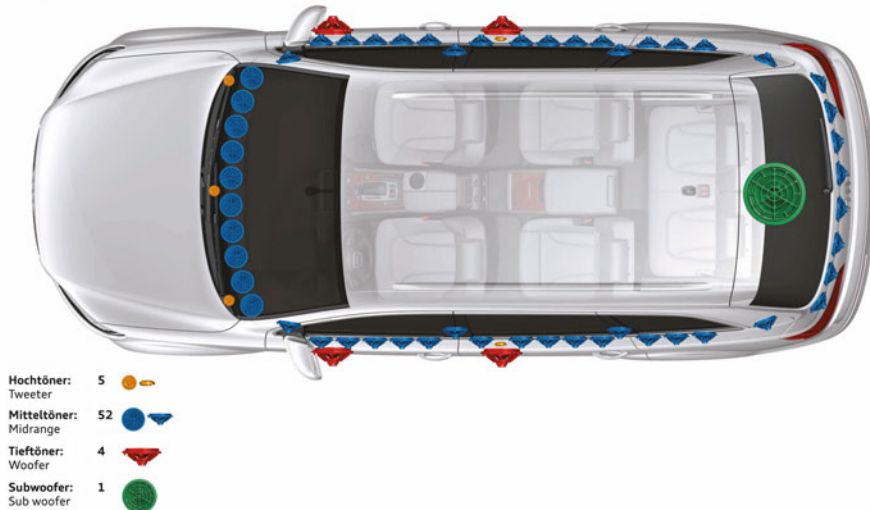


Abb. 22 Lautsprecher Anordnung für die Wellenfeldsynthese im Audi Q7 (Laborstadium)

räumlicher Höreindruck verwirklichen lässt, der nicht von der Position des Hörenden abhängig ist (siehe Abb. 22).¹²

Literatur

- Ahnert W, Goertz A (2008) Beschallungstechnik, Beschaltungsplanung und Simulationen. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer Verlag, Berlin, S 491–549
- Goertz A (2008) Lautsprecher. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer, Berlin, S 421–490
- Jarass HD (2015) Bundes-Immissionsschutzgesetz. Kommentar unter Berücksichtigung der Bundes-Immissionsschutzverordnungen, der TA Luft sowie der TA Lärm. Beck Verlag, München
- Maier P (2008) Studioakustik. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer Verlag, Berlin, S 268–311
- Meroth A, Tolg B (2008) Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug. Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden
- Müller S (1999) Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher. Rheinische Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Schmitz A, Goertz A, Makarski M (2011) Beschallungskonzepte für Bahnhöfe. Fortschritte der Akustik – DAGA Düsseldorf, S 109–110
- Slavik K, Weinzierl S (2008) Wiedergabeverfahren. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer, Berlin, S 609–685

¹²Slavik und Weinzierl 2008, S. 664 ff.

- Weinzierl S (2008) Aufnahmeverfahren. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer, Berlin, S 551–607
- Wendt K (1964) Das Richtungshören bei Zweikanal-Stereophonie. Rundfunktechnische Mitteilungen 8(3):171–179
- Winckel F (1962) Optimum acoustic criteria of concert halls. J Acoust Soc Am 34(1):81–86

Normen und Standards

- DIN EN 60268-16:2011. Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex.
- DIN 15905-5:2007. Veranstaltungstechnik – Tontechnik – Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen elektroakustischer Beschallungstechnik.
- DIN EN 60849:1999. Elektroakustische Notfallwarnsysteme.
- DIN IEC 268-1:1988. Elektroakustische Geräte – Teil 1: Allgemeines.
- DIN VDE 0833-4:2014. Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall – Teil 4: Festlegungen für Anlagen zur automatischen Sprachalarmierung im Brandfall.
- EBU Tech 3276-E:2004. Listening Conditions for the Assessment of Sound Programme Material – Supplement 1, Multichannel Sound.
- SSF-01.01.2002. Hörbedingungen und Wiedergabeanordnungen für Mehrkanal-Stereophonie.

Weiterführende Literatur

- Eargle J (2003) Loudspeaker handbook, 2. Aufl. Springer Science & Business Media, Boston. Umfassende Darstellung von Lautsprechertechnologien, von der Schaltungstechnik über Wandlertypen, Lautsprecherentwurf bis zur Computersimulation von Beschallungsanlagen
- Maier P (2008b) Studioakustik. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik. Springer, Berlin, S 268–311. Grundlagen der Planung und Einmessung von Lautsprechersystemen für Tonstudio
- Wolfgang A, Goertz A (2008) Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulationen. In: Weinzierl S (Hrsg) Handbuch der Audiotechnik, Springer, Berlin, S 491–549