

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Die Basics der Raumakustik

Kann man Akustik wirklich ausrechnen?

Wie beeinflusst die Akustik eines Raumes den Klang der Lautsprecher?

Referent: Volker Löwer, IFBcon

Vorwort

Akustik im wissenschaftlichen Sinne ist ein sehr umfassende Disziplin. Sie reicht von der technischen Akustik, die sich z. B. mit der Schwingungsanalyse von Bauwerken und Fahrzeugen, der Schalldämmung von Wänden etc. auseinandersetzt, bis zur Psychologie des Hörens, die sich u. a. anderem mit der Lästigkeit von Lärm befasst.

Über einen bestimmten Teilbereich „der Akustik“ wird besonders viel geredet und diskutiert, über „die Akustik“ bei einem Konzert, „die Akustik“ von Räumen, über gute und schlechte Akustik. Oftmals wird auch behauptet, dass „Akustik“ nicht greifbar sei, da ja das akustische Erlebnis, also das Hörerlebnis, ein subjektiver Vorgang sei, der sich objektiven Kriterien entziehe. Daher hält sich auch auf breiter Front die Meinung auch die „Berechnung der Akustik“ sei nicht möglich, es sei mehr oder weniger ein Zufallsprodukt an dem die Fachleute, also die Akustiker, zusammen mit anderen herumbasteln und dann schauen was dabei herauskommt.

Sicherlich ist das Hörerlebnis ein subjektiver Prozess und unterliegt damit vielen subjektiven Einflüssen. Alle unsere Umwelterlebnisse werden mit den Sinnesorganen aufgenommen und sind so alle als subjektive Erfahrungen zu werten.

Subjektive Erfahrungen und Empfindungen berechnen oder vorausbestimmen zu wollen wäre nun wohl ein vermessenes Unterfangen, obwohl es Disziplinen gibt, die sich im weiteren Sinne damit auseinandersetzen.

Beschränken wir uns hier auf die Übertragung von Schallereignissen, mit und ohne elektroakustische Verstärkung, also den Teil „der Akustik“, über den häufig so kontrovers diskutiert wird.

Sicherlich spielt dabei die subjektive Einstellung und Wahrnehmung des Zuhörers eine wichtige Rolle, aber damit diese Wahrnehmung überhaupt geschehen kann muss zunächst einmal eine Übertragung des akustischen Ereignisses an den Zuhörerort im physischen bzw. physikalischen Sinne stattfinden.

Glaubt man an die kausalen Zusammenhänge von Ursache und Wirkung in unserer Welt, dann ist die Qualität und der Umfang dieser Übertragung die Grundlage dessen, auf dem dann die subjektive Wahrnehmung des Zuhörers aufsetzt. Anders ausgedrückt heißt dies: zu einem Ereignis können nur dann subjektive Komponenten ins Spiel kommen, wenn dieses Ereignis überhaupt wahrgenommen, empfunden werden kann.

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Das akustische Ergebnis oder Erlebnis ist dann kein Mysterium, es ist immer die Konsequenz aus den Planungen und Ausführungen, dem Handeln und Tun derjenigen, die Räume gestalten, elektroakustische Anlagen einsetzen, den Akteuren die das Programm aufführen und der subjektiven Komponente des Zuhörers.

Zur Übertragung und Qualität von Schallereignissen gibt es eine lange Tradition von wissenschaftlichen Untersuchungen, Modellvorstellungen und Rechenmodellen. Diese gestatten es uns die physikalische Qualität von Schallereignissen zu beschreiben.

Natürlich besitzen diese Beschreibungen gewissen Beschränkungen; wir benutzen Modelle, die die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung beschreiben.

Außerdem haben alle Modelle noch die Einschränkung, dass sie ihre Gültigkeit nur unter gewissen Rahmenbedingungen haben. Diese Modelle sind nie perfekt, da sie die Komplexität der Natur vereinfachen, um sie für uns überhaupt handhabbar zu machen. Aber dieser Umstand ist in allen Teilen unseres Lebens und der technischen Welt zu finden. Auch Statiker, Mathematiker, Ärzte, Soziologen, Pädagogen, Ökonomen und Ökologen benutzen Modellvorstellungen zur Beschreibung von Zusammenhängen und zur Planung und Entscheidungsfindung.

Wichtig für die praktische Anwendung und den Erfolg dieser Handlungsweise ist, dass die Modelle hinreichend genaue Aussagen liefern, um Beurteilungen und Entscheidungen über die entsprechenden Ausführungs- und Handlungsmöglichkeiten treffen zu können.

Die akustischen Modelle für raum- und elektroakustische Übertragung liefern schon seit langer Zeit recht brauchbare Ergebnisse. Sie sind teilweise auch so weit entwickelt, dass Zusammenhänge zwischen gewissen Bereichen der subjektiv empfundenen Hörerlebnisse und den objektivierbaren Parametern akustischer Übertragungsqualität beschrieben werden können. Zudem existieren inzwischen einige Software-Produkte, die die teilweise recht aufwendige Rechenarbeit für akustische Zusammenhänge übernehmen und die zu erwartenden Ergebnisse anschaulich und zum Teil sogar hörbar darstellen.

Unerwartete und unerwünschte Ergebnisse haben häufig folgende Ursachen:

- Die vorhandenen Modelle werden gar nicht angewandt
- Die Eingangsparameter für die Modelle sind zu ungenau oder falsch
- Die Ergebnisse aus den Modellen werden falsch interpretiert
- Der Gültigkeitsbereich der Modelle wird nicht beachtet
- Die Ausführungen weichen stark von den Planvorgaben ab
- Kompromisse zugunsten anderer Eigenschaften werden eingegangen

Die Übertragung von Schallereignissen, mit und ohne elektroakustische Verstärkung, beinhaltet oft die Aufgabe Sprache verständlich zu übertragen. Ob etwas im akustischen Sinne verstanden worden ist oder nicht, lässt sich relativ

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

leicht überprüfen, obwohl Verstehen ein sehr komplexer Vorgang ist, der neben der physikalischen Übertragung des Schallereignisses an sich einen großen Teil der subjektiven Erlebnisebene des Zuhörers, Gehörphysiologie und Psychologie einschließt.

Überblick

Die Qualität eines Schallereignisses am Zuhörerort wird von den Eigenschaften des Raumes, also der Raumakustik, den Eigenschaften der Schallquelle, ihrer räumlichen Anordnung zueinander und von der Empfangsposition des Zuhörers bestimmt. Sind diese Eigenschaften bekannt, kann die Qualität des Schallereignisses an den Zuhörerorten bestimmt bzw. bestimmte wesentliche Parameter am Zuhörerort auch berechnet werden.

Die Auslegung von elektroakustischen Übertragungseinrichtungen zur Verbesserung der Qualität des Schallereignisses am Zuhörerort (oder zur Vergrößerung des Zuhörerkreises) ist damit auch in starkem Maße von den raumakustischen Voraussetzungen abhängig.

Idealerweise sollte die Raumakustik auch unter dem Aspekt des Einsatzes einer Beschallungsanlage ausgelegt werden, wenn eine solche eingesetzt werden soll. Eine gezielte Auslegung einer Beschallungsanlage zur Verbesserung der Qualität des Schallereignisses am Zuhörerort ist ohne Kenntnis der raumakustischen Situation nicht möglich.

Einige wesentliche Zusammenhänge und Abhängigkeiten sollen hier am akustischen Qualitätskriterium Sprachverständlichkeit beispielhaft erläutert werden.

Die nachfolgenden Darstellungen und Zusammenhänge enthalten aufgrund des zur Verfügung stehenden Rahmens der Veranstaltung einige Vereinfachungen, die nicht besonders gekennzeichnet sind. Weiterführende und detailliertere Betrachtungen können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden.

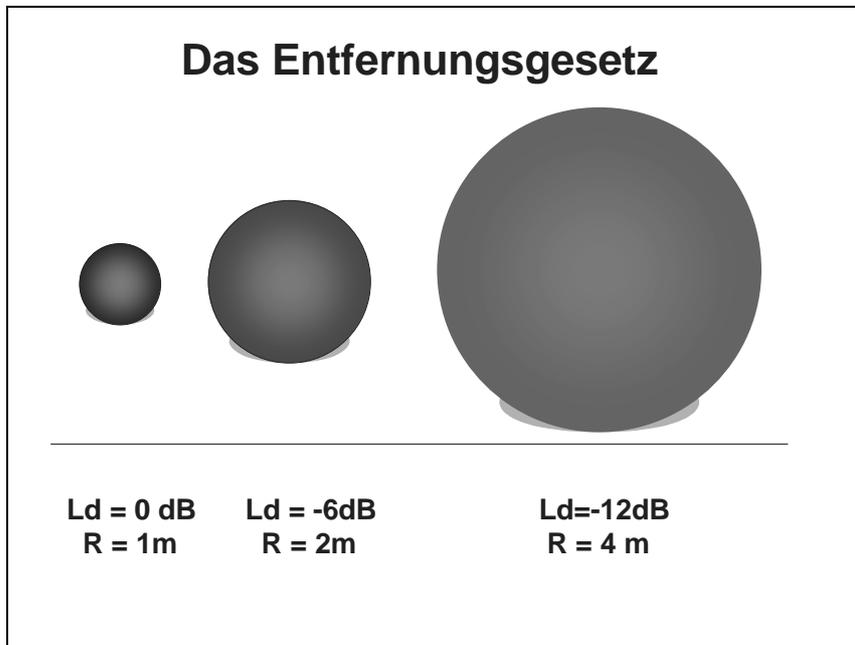
Freifeld

Unter den sogenannten Freifeldbedingungen versteht man in der Akustik eine Umgebung in der eine ungestörte Schallausbreitung (ohne die Einflüsse räumlicher Begrenzungen) gegeben ist. Man kann sich dazu näherungsweise z.B. eine sprechende Person auf einer großen, freien Fläche vorstellen.

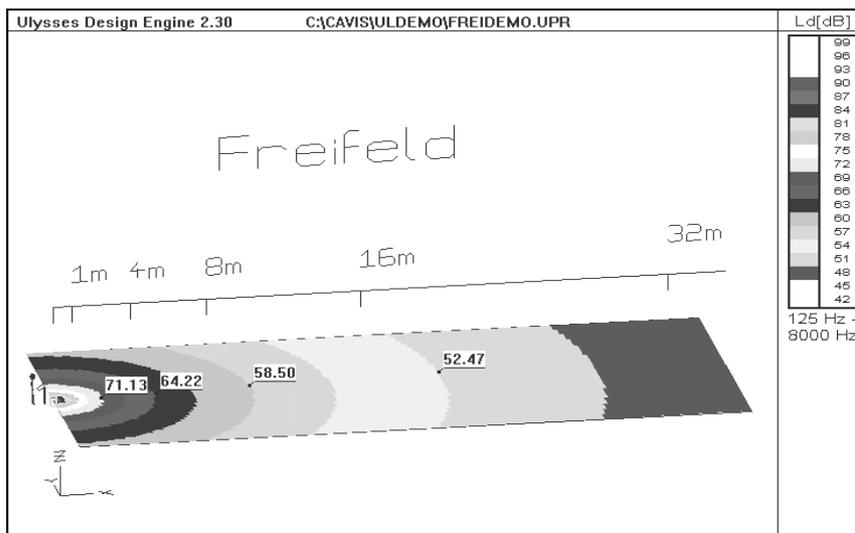
Kennt man nun die Eigenschaften der Schallquelle (Sprecher oder auch Lautsprecher) und die Entfernung zum betrachteten Zuhörerort, so kann mit der Schallgeschwindigkeit die Laufzeit und mit dem Entfernungsgesetz der Schalldruckpegel bestimmt werden.

Von einer Schallquelle aus breiten sich die Schallwellen mit konstanter Geschwindigkeit (340m/s bei 20°C, oder ca. 1m/3ms) nach allen Richtungen aus. Dabei nimmt die Intensität des Schallereignisses mit steigender Entfernung ab,

da sich die Schallenergie mit steigender Entfernung auf eine immer größere Fläche verteilt. Die Kugelfläche um eine Quelle steigt bei jeder Verdopplung des Radius auf das 4-fache, die Intensität sinkt auf $\frac{1}{4}$, als Pegel ausgedrückt um 6 dB.



Der Schalldruckpegel sinkt daher bei jeder Entfernungsverdopplung um 6 dB (z.B. in 1m 75dB SPL, in 2m 69dB SPL, in 4m 63 dB SPL...), es wird immer leiser, je weiter man sich von der Quelle entfernt.



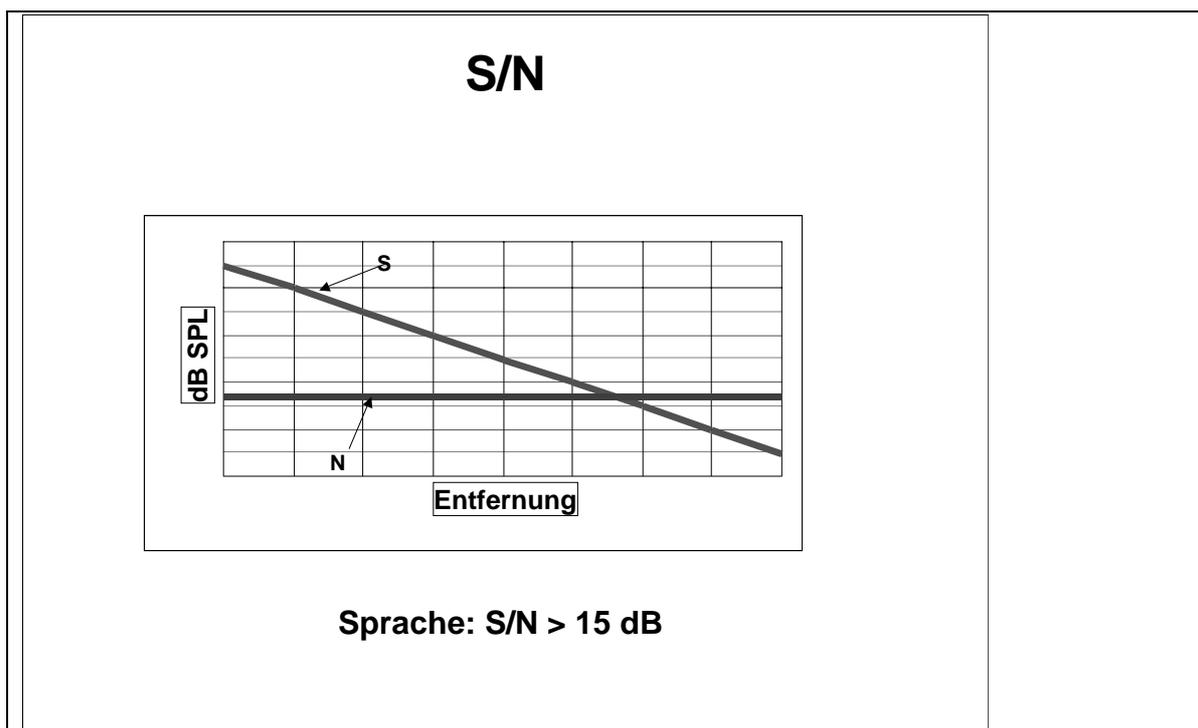
Dies entspricht auch unserer täglichen Erfahrung. Schaut (hört) man sich die Schalldruckpegel (Lautstärke) des Signals für verschiedene Entfernungen an so stellt man fest, dass ein Zuhörer in 32m Entfernung für unser Beispiel noch 45dB SPL empfängt; auch in etwa 500m sind es immerhin noch 21 dB SPL.

Da die Hörschwelle bei 0 dB SPL liegt, müsste das Signal des Sprechers am Zuhörerort in 500 oder 1.000 m Entfernung also noch gehört und verstanden werden können. Die Erfahrung lehrt jedoch, dass dies im Alltag nicht der Fall ist.

Signale/Störgeräusche

Durch die in unserer Umwelt überall vorhandenen Umgebungsgeräusche (Störgeräusche, engl.: **Noise**) wird die Qualität der akustischen Übertragung am Zuhörerort vermindert.

Das Nutzsignal (Signal, engl.: **Signal**) unseres Sprechers wird mit zunehmender Entfernung schwächer und die Störgeräusche verdecken es mehr und mehr. Das Nutzsignal ist zwar immer noch da und hörbar, aber die Störgeräusche haben ab irgendeiner bestimmten Entfernung einen so hohen Pegel, dass das Nutzsignal nicht mehr erkannt und verstanden werden kann.



Untersuchungen haben gezeigt, dass Sprache dann nahezu vollständig verstanden werden kann, wenn der Nutzpegel des Signals am Zuhörerort etwa 15 dB größer ist als der Pegel des Störsignals ($S/N > 15$ dB). Bei dieser Pegeldifferenz liegt die Modulation normaler Sprache vollständig über dem Störgeräuschpegel.

Wird die Sprachmodulation vom Störgeräusch mehr und mehr verdeckt, sinkt auch die Verständlichkeit. Dies kann soweit gehen, dass unter bestimmten

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Bedingungen (Gespräch in der Disco oder neben einem Jet-Triebwerk) das Nutzsinal überhaupt nicht mehr zu verstehen ist.

Mit der Beschreibung der Pegeldifferenz S/N kann also auch schon ein Teil der akustischen Qualität am Zuhörerort, z.B. auch die Verständlichkeit beschrieben werden.

Das Erreichen eines ausreichenden Nutzpegels im Verhältnis zum Störgeräusch ist also immer ein ganz wesentlicher Faktor. Dies gilt bei bei der Übertragung im Freien und in Räumen genauso, wie mit oder ohne elektroakustische Anlagen.

Es ist daher leicht nachzuvollziehen, dass auch die hochwertigste Übertragung nichts nutzt, wenn sie in Störgeräuschen untergeht und dadurch nicht wahrgenommen und verstanden werden kann.

Was ist Raumakustik ?

Raumakustik beschäftigt sich mit der bautechnischen Gestaltung von Räumen im Hinblick auf ihre akustischen Eigenschaften. Wie transportiert und verteilt ein bestimmter Raum die Energie akustischer Ereignisse.

Oft wird im Sprachgebrauch von guter oder schlechter Akustik gesprochen. Diese Bewertung ist als solche nicht interpretierbar, da für einen bestimmten Zweck bestimmte akustische Eigenschaften günstig sind, die für einen anderen Zweck ungünstig sein können. So eignet sich z.B. die lange Nachhallzeit einer Kirche gut für Orgelmusik, aber weniger gut für eine Konferenz.

Die Frage nach der Qualität von raumakustischen Eigenschaften kann also nur in Verbindung mit der angestrebten Nutzung beantwortet werden.

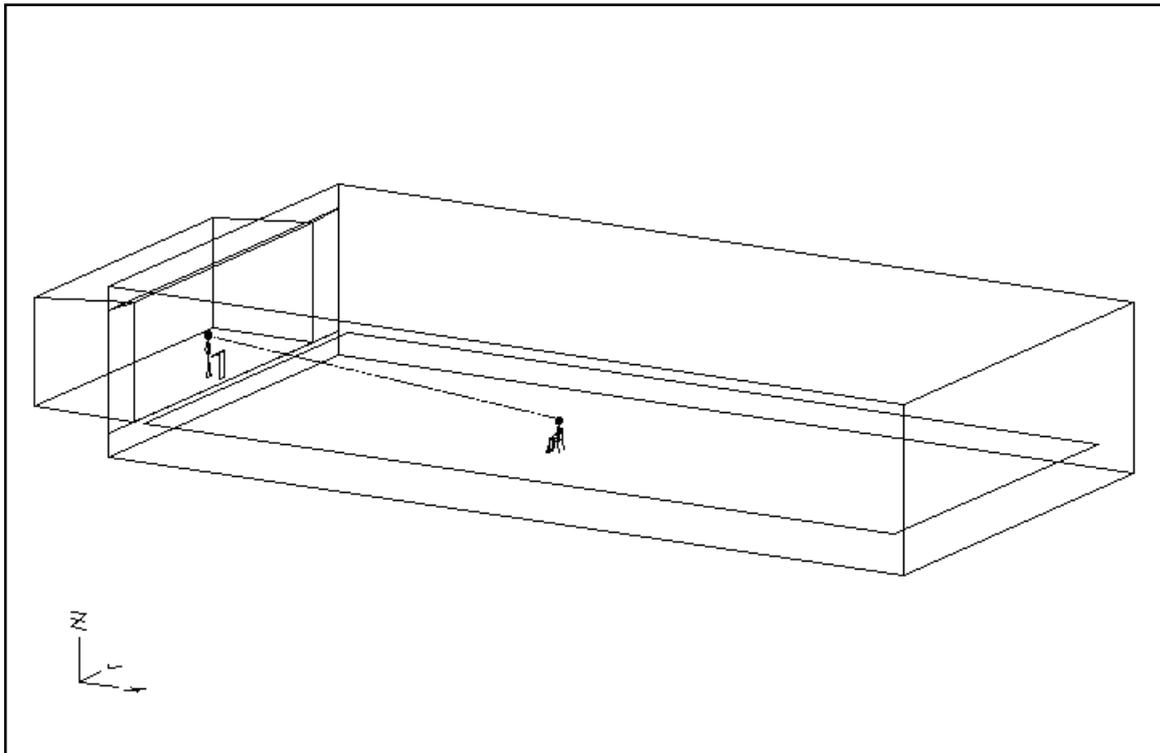
Ganz besonders wichtig sind die raumakustischen Eigenschaften, wenn ein Beschallungsanlage eingesetzt werden soll, da die Lautsprecher zusammen mit der Raumakustik insgesamt eine neue akustische Situation schaffen.

Mechanismen der Raumakustik

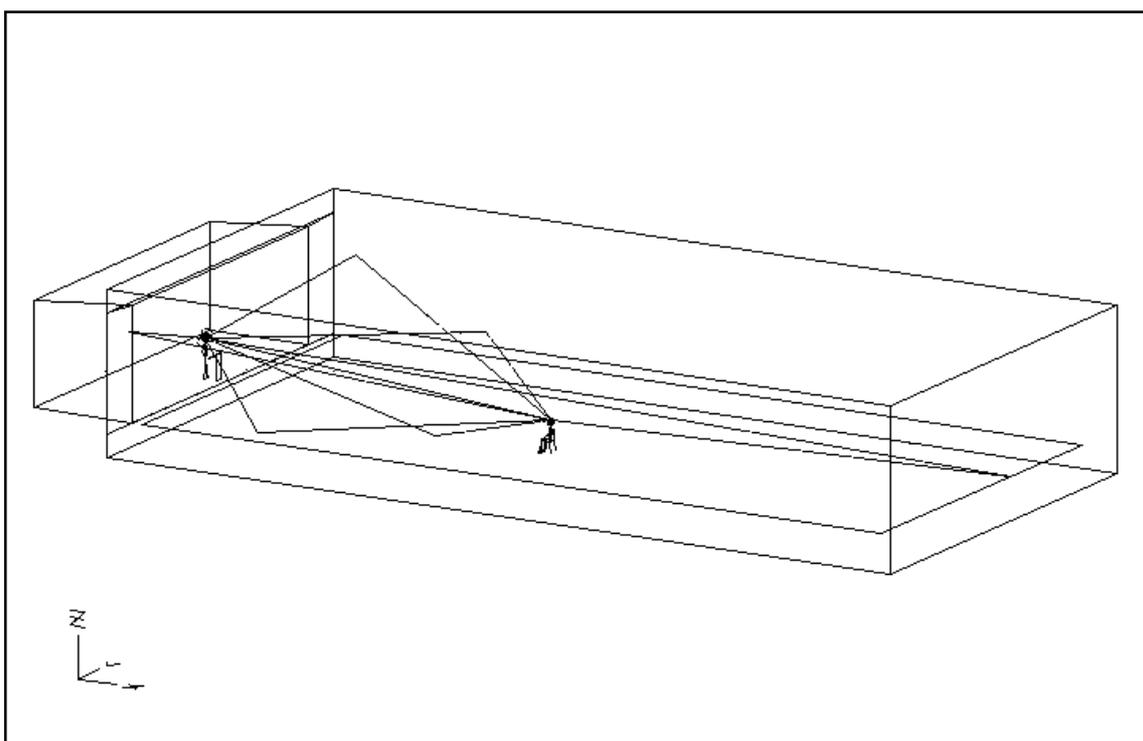
Hier sollen nur die wesentlichen Mechanismen der Ausbreitung akustischer Energie in Räumen betrachtet werden.

Den Teil der akustischen Energie, der auf direktem Weg von der Quelle zum Zuhörer gelangt, wird Direktschall genannt.

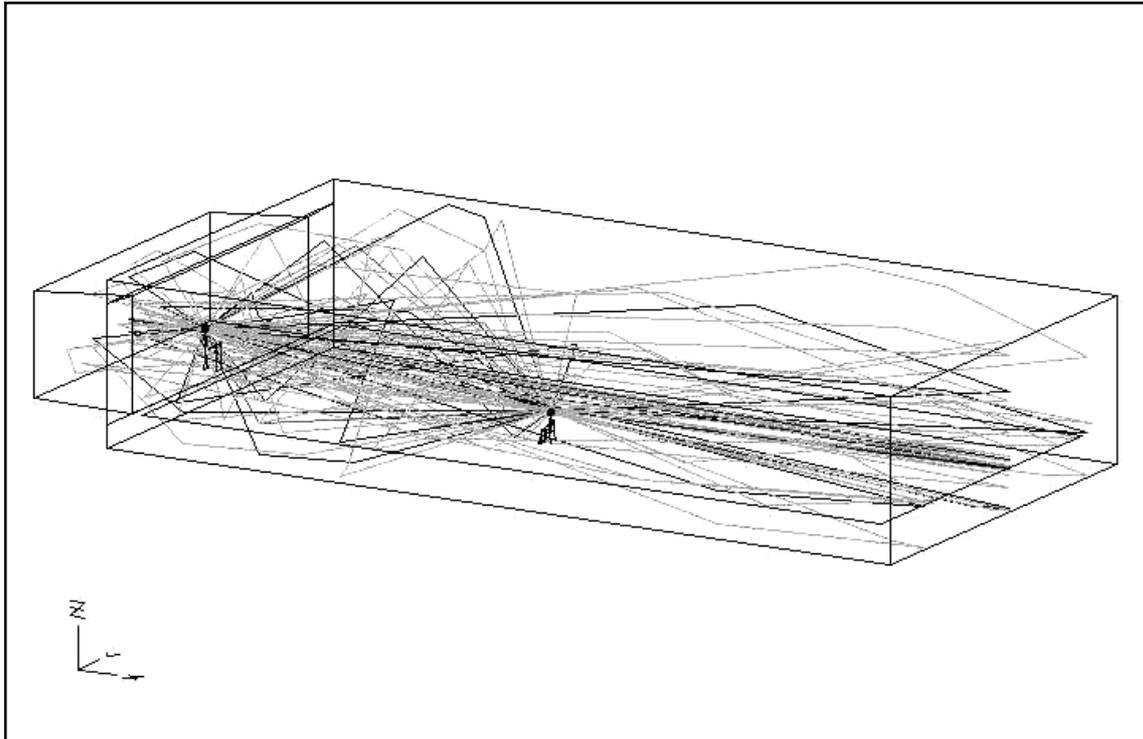
Der Direktschall ist, da er der Anteil mit dem kürzesten Weg ist, auch immer zuerst am Ziel. Der Direktschall ist frei von Einflüssen der Raumakustik und entspricht den Verhältnissen, wie sie für das Freifeld bereits beschrieben wurden.



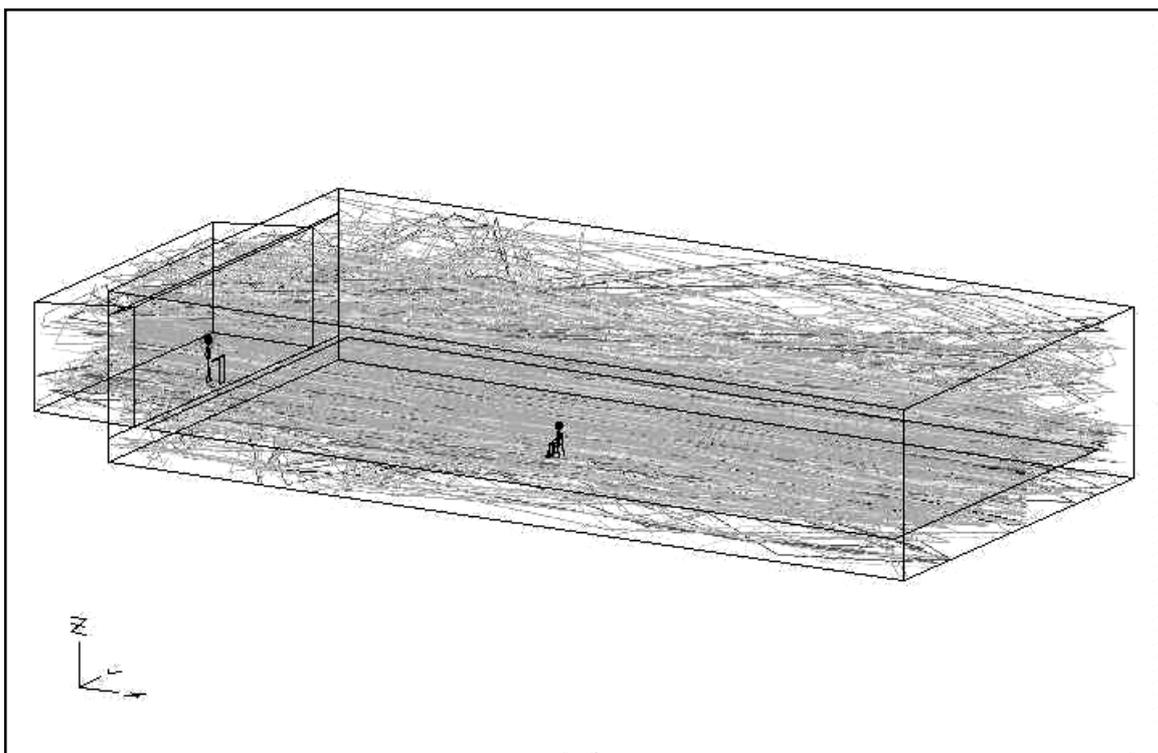
In Räumen trifft der Schall, je nach Größe und Form des Raumes, irgendwann auf Begrenzungen, auf Wände, den Boden, die Decke. Die Schallenergie kann nun zurückgeworfen (Reflexion), geschluckt (Absorption) oder durchgelassen (Transmission) werden. Je nachdem, welche akustischen Eigenschaften die Begrenzungsfläche hat, wird mehr oder weniger geschluckt, reflektiert oder durchgelassen.



Dadurch, dass die akustische Energie von den Raumbegrenzungen zu einem mehr oder weniger großen Teil in den Raum zurückgeworfen wird, entstehen eine Vielzahl von Reflexionen.



Durch wiederholte Reflexionen und weitere Ausbreitung ist die verbleibende Schallenergie irgendwann nahezu gleichmäßig im Raum verteilt .



Das so entstandene Schallfeld wird als Nachhall bezeichnet. Mit der Nachhallzeit wird nun angegeben, wie schnell die gleichmäßig verteilte Schallenergie von den Begrenzungsflächen geschluckt wird.

Mit der örtlichen, zeitlichen und frequenzmäßigen Zusammensetzung von Direktschall, Reflexionen und Nachhall können die wichtigsten akustischen Eigenschaften eines Raumes beschrieben werden.

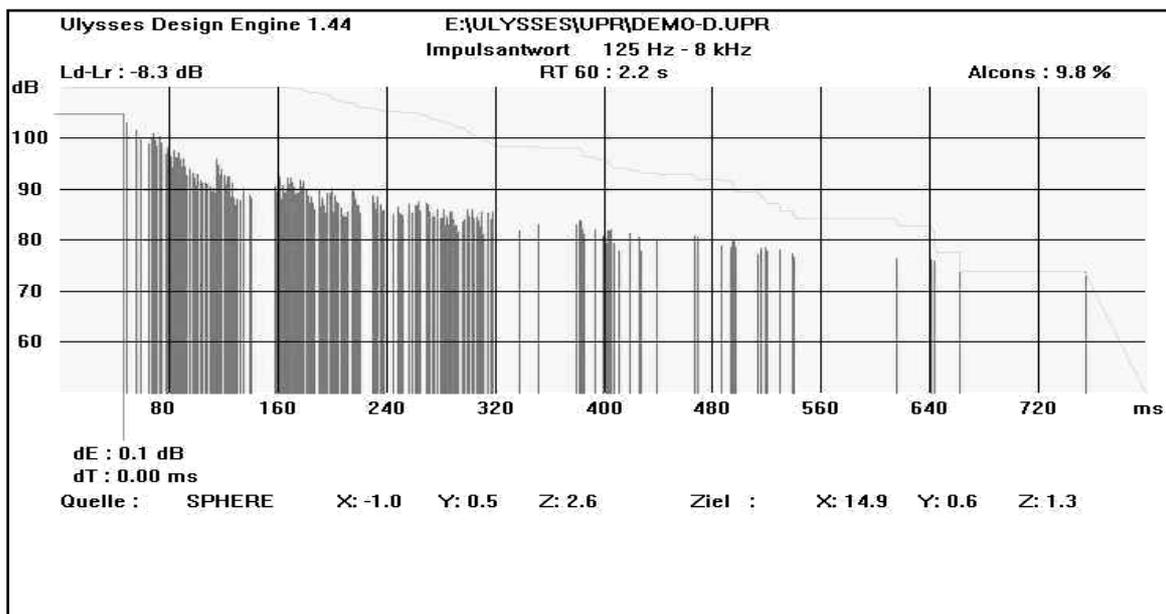
Direktschall

Kennt man die Eigenschaften der Schallquelle und die Entfernung zum betrachteten Zuhörerort, so kann (wie im Freifeld) mit der Schallgeschwindigkeit die Laufzeit und mit dem Entfernungsgesetz der Schalldruckpegel am Zuhörerort bestimmt werden (**Direktschallfeld**, engl.: **Direct Sound**)

Reflexionen

Alle Reflexionen treffen zeitlich nach dem Direktschall, und im Normalfall, d.h. wenn keine konzentrierenden Effekte der Raumbegrenzungen vorliegen, auch mit geringerer Energie beim Zuhörer ein.

Kennt man die Lage, Entfernung und Reflexions- oder Absorptionseigenschaften der Flächen, die den Raum begrenzen, so können auch die Laufzeiten, Richtungen und die Schalldruckpegel der einzelnen Reflexionen für den jeweiligen Zuhörerort bestimmt werden. Die zeitliche Darstellung heißt auch für einen Impuls wird auch Impulsantwort oder allgemeiner als Reflektogramm bezeichnet. Sie gilt jeweils nur für einen Empfangsort.



Die unterschiedlichen Ankunftszeiten des gleichen akustischen Ereignisses am Ohr können sich sowohl positiv als auch negativ auswirken.

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Es hängt von den Pegelverhältnissen und den Zeitdifferenzen ihres Eintreffens am Hörerort ab, ob sie für den Hörer zu einem Ereignis verschmelzen (nützlicher Rückwurf), oder als getrennte Ereignisse wahrgenommen werden (Echo).

Eine Grundaufgabe der Raumakustik ist es nützliche Rückwürfe zu schaffen und gleichzeitig schädliche Rückwürfe zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Diese Bedingungen sollten natürlich auch für den Einsatz einer Beschallungsanlage gewährleistet sein.

Hierbei ist besonders zu beachten, dass die natürlichen Quellen (Redner, Instrumente) von anderen Stellen im Raum abstrahlen, als es die eingesetzten Lautsprecheranlagen tun.

Durch diese anderen Anordnungen der Quellen werden auch andere Reflexionsstrukturen erzeugt, die dadurch auch andere nützliche und schädliche Rückwürfe enthalten. Diese Tatsache wird bei vielen Projekten leider oft übersehen.

Nachhall

Die Nachhallzeit T_{60} ist eine der am häufigsten verwendeten Größen der Raumakustik. Sie beschreibt die Zeit, nach der ein Schallereignis in einem Raum auf ein Millionstel (-60 dB) der Anfangsenergie abgefallen ist. Dies entspricht einer Abnahme des Schalldruckes von ebenfalls 60 dB.

Aus dem Volumen des Raumes und den Schallschluckeigenschaften aller Begrenzungsflächen kann die Nachhallzeit bestimmt werden (s. a. Wallace. C. Sabine).

Voraussetzung für die Übereinstimmung von Berechnung und Realität ist ein gleichmäßige Verteilung der Nachhallenergie im Raum (statistisches Modell, diffuses Nachhallfeld), die wiederum eine gleichmäßige Verteilung der absorbierenden Flächen im Raum voraussetzt.

Die Nachhallzeit alleine eignet sich nicht unbedingt direkt und alleine zur Beurteilung der akustischen Qualität eines Raumes. Zusätzlich müssen in jedem Fall mindestens noch der Verwendungszweck und das Raumvolumen berücksichtigt werden. Allgemein kann gesagt werden, dass in größeren Räumen längere Nachhallzeiten toleriert werden können als in kleinen Räumen. Weiterhin sind bei gleichem Raumvolumen für Musikveranstaltungen längere und für Sprachdarbietungen kürzere Nachhallzeiten günstig.

Es ist also nicht unbedingt richtig zu behaupten, dass ein Raum mit 2,0s Nachhallzeit eine "schlechtere Akustik besitzt, als ein anderer Raum mit 1,2s.

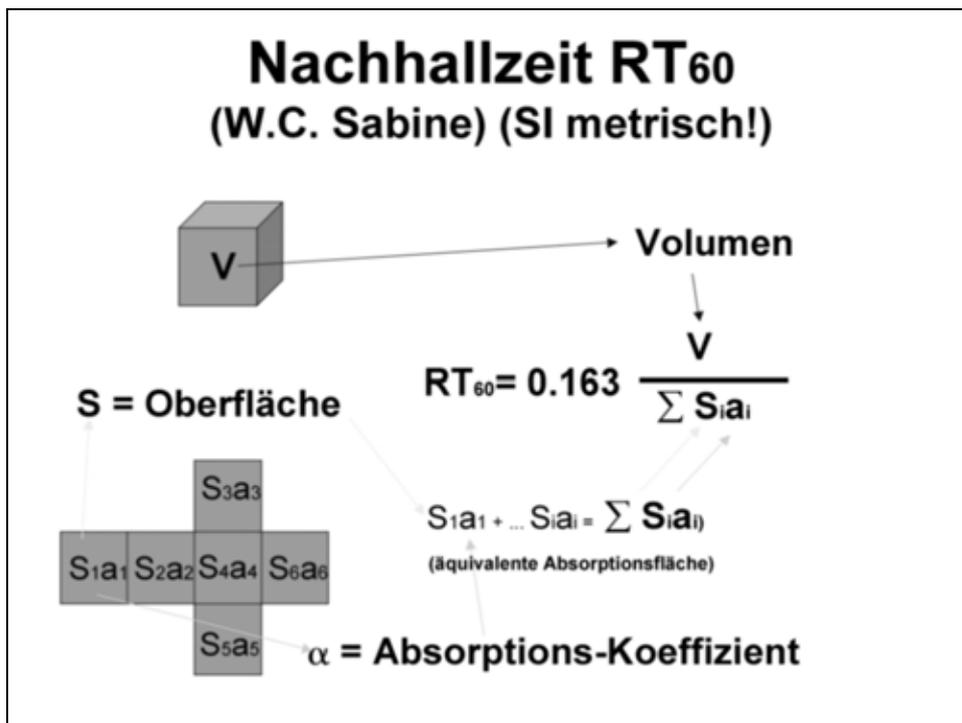
Außerdem ist die Nachhallzeit eine frequenzabhängige Größe, da auch die Raumbegrenzungen frequenzabhängige Absorptionseigenschaften besitzen. Daher sollte auch immer ein Nachhall-Frequenzgang angegeben, berechnet oder gemessen werden. Im allgemeinen sind größere Nichtlinearitäten im Nachhall-Frequenzgang nicht erwünscht.

Schließlich muss noch damit gerechnet werden, dass bei verschiedenen Veranstaltungen mit unterschiedlicher Publikumsabsorption zu rechnen ist.

Hierbei muss sichergestellt werden, dass auch bei einer festgelegten Minimalbesetzung noch geeignete akustische Verhältnisse zu erwarten sind.

Sabine'sches Modell

Für die Berechnung der Nachhallzeit gibt es verschiedene Modelle und Algorithmen. Für Räume mit geringer Absorption (Schallschluckung) wird im allgemeinen die Beziehung von Wallace C. Sabine, die sogenannte Sabine'sche Beziehung benutzt.

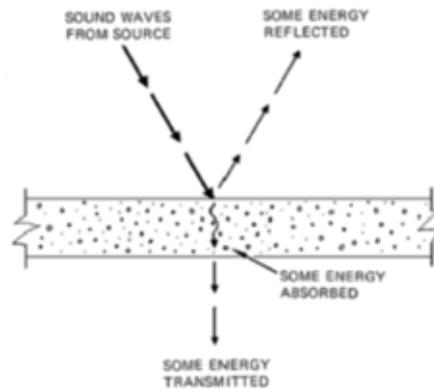


Hierbei wird das gesamte Raumvolumen V , alle Raumbegrenzungsflächen S_i und die sogenannten Absorptionskoeffizienten α_i der einzelnen Flächen benötigt.

Die Anwendung dieses Modells geht von einem ideal diffusen, statistischen Nachhallfeld (Diffusfeld) aus. Für Räume mit sehr einseitig, also ungleichmäßig verteilter Absorption, oder auch für fokussierende Räume gilt dieses Modell nicht, oder aber nur mit Einschränkungen.

Der Absorptionskoeffizient α beschreibt wie viel akustische Energie von einer Begrenzungsfläche absorbiert wird. Besitzt eine Fläche z.B. ein $\alpha = 0,70$ so bedeutet dies, dass 70% der auf die Fläche eintreffenden Energie absorbiert, also geschluckt wird. Folglich werden die übrigen 30% der Energie in den Raum zurückgeworfen.

Absorption, Reflexion, Transmission



ALL THREE EFFECTS MAY VARY WITH FREQUENCY AND ANGLE OF INCIDENCE.
THEY DO NOT VARY WITH INTENSITY IN TYPICAL SITUATIONS.

Die Berechnung der Nachhallzeit nach dem Sabine'schen Modell ist vom Grundsatz her recht einfach, kann sich jedoch recht aufwendig gestalten wenn viele Flächen mit unterschiedlichen Materialien und viel verschiedene Frequenzbänder betrachtet werden sollen.

Für Räume mit recht hoher Gesamtabsorption wird die Berechnung nach Eyring benutzt, außerdem gibt es noch verschiedene andere Rechenmodelle für verschieden Voraussetzungen. Im Rahmen dieser Grundlagenbetrachtung wird jedoch ausschließlich das Sabine'sche Modell betrachtet.

Für weitere Informationen muss auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden. Eine Übersicht über die am häufigsten verwendeten Modelle findest du in der folgenden Tabelle.

REVERBERATION TIME EQUATIONS: T = 60dB DECAY TIME IN SECONDS		
EQUATION:	ENGLISH UNITS: S = SURFACE AREA IN FT ² V = VOLUME IN FT ³	SI UNITS: S = SURFACE AREA IN m ² V = VOLUME IN m ³
SABINE – GIVES BEST CORRESPONDENCE WITH PUBLISHED ABSORPTION COEFFICIENTS WHERE $\bar{\alpha}$ IS LESS THAN 0.2	$T = \frac{.049V}{S \bar{\alpha}}$	$T = \frac{.16V}{S \bar{\alpha}}$
EYRING – PREFERRED FORMULA FOR WELL-BEHAVED ROOMS HAVING $\bar{\alpha}$ GREATER THAN 0.2 OR SO	$T = \frac{.049V}{-S \ln (1-\bar{\alpha})}$	$T = \frac{.16V}{-S \ln (1-\bar{\alpha})}$
FITZROY-(SABIN) – FOR RECTANGULAR ROOMS IN WHICH ABSORPTION IS NOT WELL DISTRIBUTED.	$T = \frac{.049V}{S^2} \left(\frac{X^2}{X\alpha_x} + \frac{Y^2}{Y\alpha_y} + \frac{Z^2}{Z\alpha_z} \right)$	$T = \frac{.16V}{S^2} \left(\frac{X^2}{X\alpha_x} + \frac{Y^2}{Y\alpha_y} + \frac{Z^2}{Z\alpha_z} \right)$
α_x , α_y , AND α_z ARE AVERAGE ABSORPTION COEFFICIENTS OF OPPOSING PAIRS OF SURFACES WITH TOTAL AREAS x, y, AND z.		

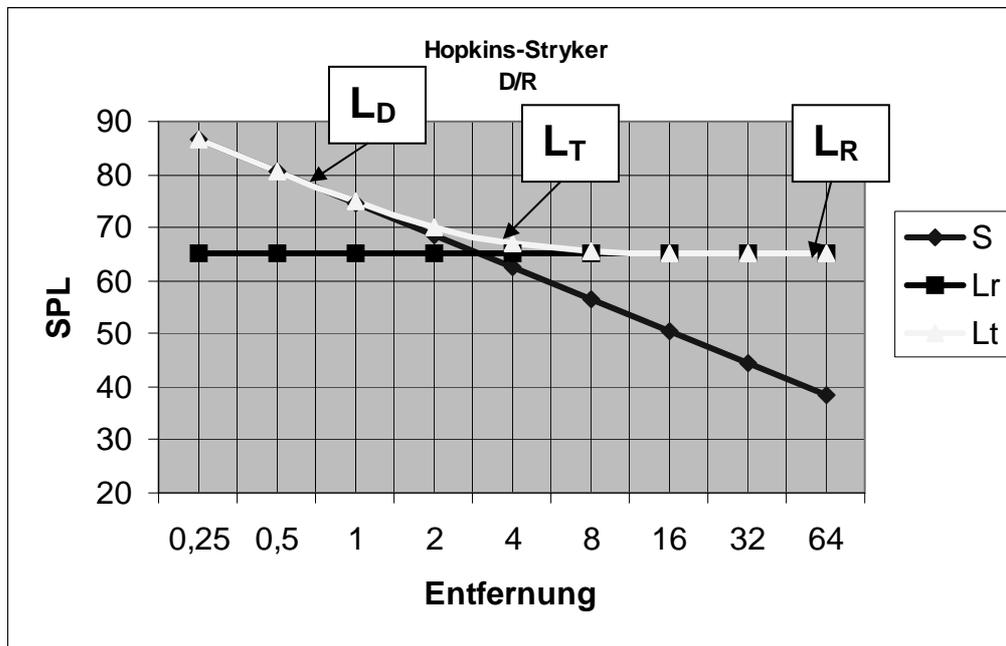
Figure 5-9. Reverberation time equations

Hallradius

Für die Beurteilung der Nachhalleigenschaften eines Raumes gibt es eine wesentlich aussagefähigere Größe, den Hallradius. Der Hallradius beschreibt den Abstand von einer kugelförmig abstrahlenden Schallquelle in einem Raum, bei welchem das Direktschallfeld genauso groß ist wie das Nachhallfeld.

Trägt man nun den Direktschallverlauf und den Nachhallpegel über der Entfernung auf, so schneiden sich beide Kurven beim Hallradius. Die Nachhallkurve (Nachhallpegel, engl.: Reverberant Sound) verschiebt sich für größere Nachhallzeiten nach oben und für kleinere Nachhallzeiten nach unten (Verdopplung der Nachhallzeit +3dB, Halbierung -3dB). Der Hallradius rH kann aus dem Raumvolumen V und der Nachhallzeit T60 bestimmt werden.

Pegel im Raum nach Hopkins-Stryker



L_D : Direktschallpegel, Abnahme 6 dB pro Entfernungsverdopplung

L_R : Nachhallpegel, aus Raumvolumen und Schluckfläche

L_T : Total, Summe aus L_D und L_R

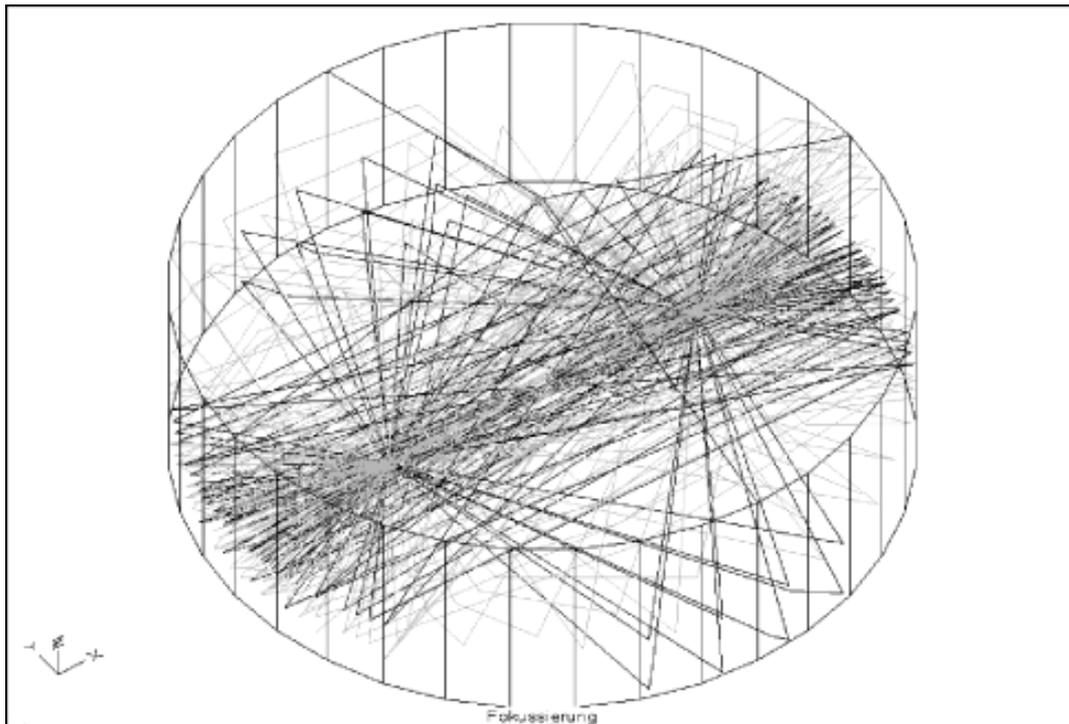
Für unterschiedliche Entfernungen von der Schallquelle kann aus dieser Darstellung das Verhältnis von Direktschallpegel zu Nachhallpegel (L_D, L_R , engl.: Level direct, reverberant), wie auch der Gesamtpegel (L_T engl.: total) als Summe dieser Pegel ermittelt werden. Dieses Verhältnis stellt einen wesentlichen Faktor für die Verständlichkeit und Klarheit des akustischen Ereignisses dar.

Mit der Beschreibung der Pegeldifferenz Direktschall zu Nachhall (D/R) erhält man so das zweite wichtige Kriterium für die Beschreibung von Verständlichkeit.

Am Verlauf der Schallfelder kann auch die Gesamtproblematik des Nachhallfeldes erkannt werden: Zum einen hilft das Nachhallfeld den weiter entfernten Zuhörern durch einen Lautstärkegewinn gegenüber dem Freifeld. Zum anderen beeinträchtigt all zu viel Nachhallfeld, im Verhältnis zum Direktschall, die Verständlichkeit und Klarheit.

Besondere Phänomene

Oftmals treten bei realen Räumen besondere Phänomene auf. So sind z.B. die schon erwähnten Echoerscheinungen, mehrfach separat hörbare Rückwürfe oder Konzentrationen von Schallenergie in einem bestimmten Raumbereich (z.B. in der Mitte eines schallharten, zylindrischen Raumes) oft die Ursache von Klagen über die "Akustik".



Diese Phänomene werden allerdings häufig als "zu lange Nachhallzeit" interpretiert.

Als Folge dieser Fehlinterpretation wird in diese Räume dann zusätzliches schallschluckendes Material eingebracht und das Nachhallfeld gesenkt. Vielfach treten dann die bemängelten Effekte noch stärker hervor, da das nun schneller abklingende Nachhallfeld sie noch weniger verdeckt. In sehr ungünstigen Fällen werden sogar noch zusätzliche störende Effekte hörbar, die vorher vom Nachhall völlig verdeckt wurden.

Bei der Minimierung störender Effekte sind daher immer genau die Ursachen festzustellen und auch genau diese zu bekämpfen. So kann z.B. eine störende Rückwandreflexion, die auf der Bühne als Echo wahrnehmbar ist, raumakustisch auch nur durch Maßnahmen auf der Rückwand beseitigt werden. Zusätzliche Absorption auf den Seitenwänden verringert in diesem Fall zwar die Nachhallzeit, macht aber gleichzeitig den Rückwurf noch besser hörbar.

Diese Effekte sind sowohl mit, wie auch ohne elektroakustische Anlagen zu beobachten. Allerdings ist zu beachten, dass je nach räumlicher Lage der

Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Quellen (natürlicher Redner, Lautsprecher) eben auch unterschiedliche Raumflächen kritische Rückwürfe und Konzentrationen hervorrufen können.

Zusammenhänge

Wie bereits erörtert sind die beiden Hauptmechanismen zur Erzielung von Verständlichkeit und Klarheit einer akustischen Übertragung in den Verhältnissen von S/N und D/R zu sehen.

Einerseits muss man also dafür sorgen, dass man das Nutzsignal im Verhältnis zu Störsignalen möglichst groß machen kann, oder, wenn möglich, das Störsignal minimieren.

Die Aufgabe kann eine Beschallungsanlage z.B. bei einer Open-Air Veranstaltung leisten, wenn die Lautstärke der natürlichen Quellen an weiter entfernten Zuhörerorten nicht mehr ausreicht.

Hier wird Verständlichkeit also einfach durch die Erzeugung größerer Nutzpegel erreicht. Grenzen sind dabei die Belastbarkeit und Leistungsfähigkeit der Lautsprechersysteme und die maximale akustische Verstärkung des System, bevor es zu Rückkopplungen kommt.

In Räumen gilt natürlich auch, dass zunächst ein ausreichender Nutzpegel gegenüber dem herrschenden Störpegel erzielt werden muss. Auch hier setzen die Leistungsfähigkeit der Lautsprechersysteme und die maximale akustische Verstärkung des System die Grenzen der Möglichkeiten.

Nun muss in Räumen aber zusätzlich noch berücksichtigt werden, dass ein ausreichendes Verhältnis von Direktschall zu Nachhallpegel erforderlich ist, um eine ausreichende Verständlichkeit sicherzustellen. Eine einfache Erhöhung der abgestrahlten akustischen Energie (Lautstärke der Quelle erhöhen) oder eine Vergrößerung der Anzahl der Quellen (mehr Lautsprecher) führt zwar zu mehr direktem Schallpegel am Zuhörerort, der Nachhallpegel wird jedoch in gleichem Maße mit vergrößert, da die Nachhallenergie ja aus der Summe der insgesamt abgestrahlten akustischen Energie der Quellen resultiert.

Hier liegt ein ganz deutlicher Unterschied zur Nutzsignal/Störsignal-Problematik vor, da Nutz- und Störsignal, im Gegensatz zu Direktschall und Nachhall, voneinander unabhängige Signale sind.

Eine Verbesserung der Verständlichkeit ist also nur dann zu erzielen, wenn das Verhältnis von D/R zugunsten eines größeren Direktschallanteils oder eines kleineren Nachhallanteils am Zuhörerort verschoben werden kann.

Als eine Lösung kann man die Richtcharakteristik von Lautsprechersystemen, bzw. die Bündelungseigenschaften heranziehen.

Diese Eigenschaften beschreiben, wie ein Lautsprechersystem die akustische Energie als Direktschall in die verschiedenen Raumrichtungen abstrahlt. Strahlt ein System akustische Energie nach allen Seiten mit gleichem Pegel ab, so spricht man auch von einem Kugelstrahler. Strahlt das System die Energie bevorzugt in einen Raumwinkelbereich ab, so spricht man von einem Richtstrahler.

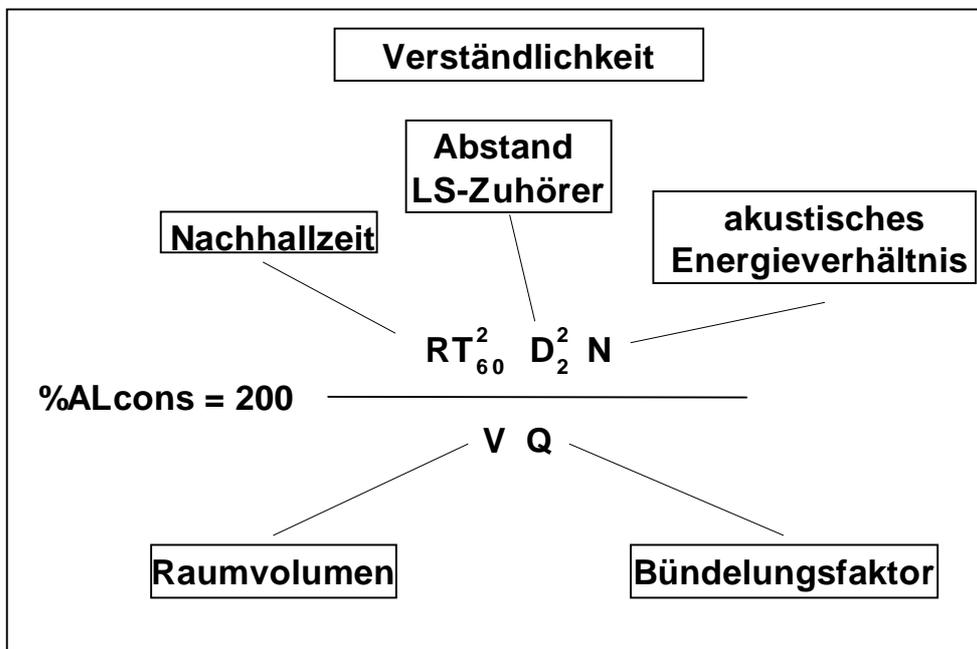
Der Vorteil eines solchen Richtstrahler gegenüber einem Kugelstrahler liegt nun darin, dass er, bei insgesamt gleicher abgestrahlter Energie, in der Hauptabstrahlrichtung ein größeres Direktschallfeld erzeugt. Da das Nachhallfeld nun aber durch die insgesamt abgestrahlte Energie und die Schallabsorptionsfläche des Raumes bestimmt wird, vergrößert sich in der Hauptabstrahlrichtung des Richtlautsprechers der Direktschall bei gleichbleibenden Nachhallpegel.

Dies führt im Ergebnis zu einer Verbesserung von D/R für die Zuhörerorte in der Hauptabstrahlrichtung und damit auch zu besserer Verständlichkeit.

Für die Auslegung einer Beschallungsanlage bedeutet dies, dass durch den Einsatz von Richtstrahlern mit entsprechenden Eigenschaften die Verständlichkeit der Übertragung erhöht werden kann.

Für die einfachsten Fall einer Auslegung kann über das Raumvolumen, die Nachhallzeit, den Bündelungsfaktor der Quelle (Lautsprecher) und der Entfernung zwischen Quelle und Zuhörer der sogenannte zu erwartende Konsonantenverlust in %ALcons (**A**rticulation**L**oss of **C**onsonants) als Anhaltspunkt für die Sprachverständlichkeit ermittelt werden.

Die recht einfache Beziehung (nach V.M.A. Peutz, D. Davis) geht allerdings davon aus, dass ein ausreichendes S/N von 15 dB und ein statistisches, diffuses Nachhallfeld ohne sonstige Anomalien vorliegt.

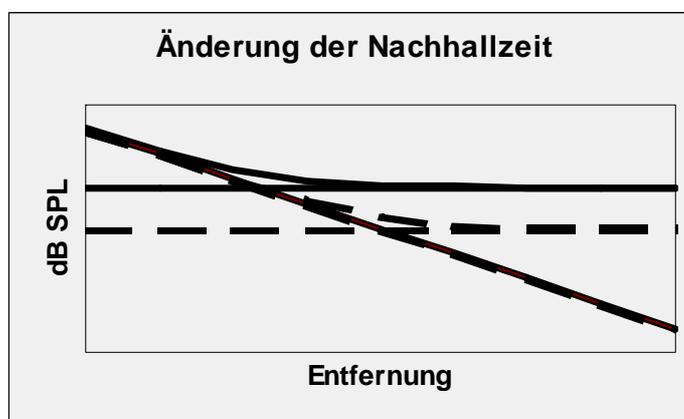
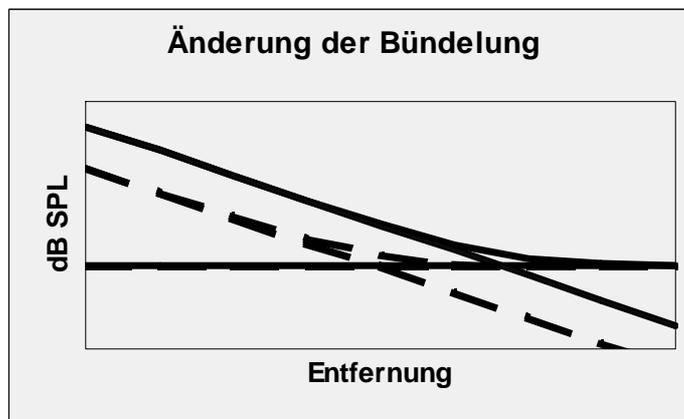
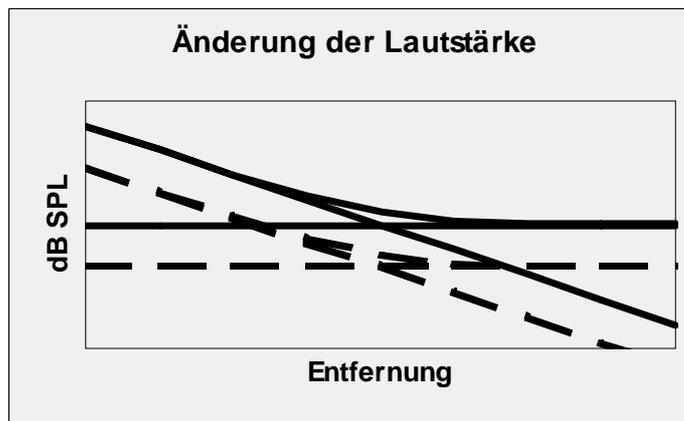


Eine weitere Möglichkeit die Verständlichkeit zu verbessern, liegt noch in der Senkung der Nachhallzeit des Raumes, die ja eine Verringerung des Nachhallpegels und damit eine Verbesserung des Verhältnisses D/R zur Folge hätte. Allerdings ist zur Verringerung des Nachhallpegels um 3 dB (dies entspricht einer Halbierung der Nachhallzeit) auch die doppelte Absorptionsfläche

im Raum erforderlich. Solche Eingriffe in die Gestaltung sind aber in der Praxis nicht nur sehr aufwendig, sondern werden auch wegen architektonischer Einwände meist nicht durchgeführt.

Änderungen der verschiedenen Parameter

Nachfolgend sind verschieden Änderungen der Schallfeldparameter schematisch dargestellt.



Die Basics der Raumakustik	
PLS mediasystems 2009, Frankfurt am Main	
Referent: Volker Löwer, IFBcon	

Zusammenfassung

Die Verständlichkeit einer akustischen Übertragung wird wesentlich von den Eigenschaften des Raumes, also der Raumakustik, den Eigenschaften der Schallquellen, ihrer räumlichen Anordnung zueinander und von der Empfangsposition des Zuhörers bestimmt.

Die Auslegung von elektroakustischen Übertragungseinrichtungen ist damit von den raumakustischen Voraussetzungen abhängig.

Idealerweise sollte die Raumakustik auch unter dem Aspekt des Einsatzes einer Beschallungsanlage ausgelegt werden.

Neben einer Auslegung für moderate Nachhallzeiten für den jeweiligen Nutzungsfall ist auch darauf zu achten, dass mit und ohne Beschallungsanlage keine anomalen raumakustischen Effekte, wie störende Reflexionen, Fokussierungen oder Echos entstehen.

Die hauptsächlich bestimmenden Kenngrößen der akustischen Übertragungsqualität für die Verständlichkeit sind das Verhältnis von Nutz- und Störsignalpegel S/N und das Verhältnis von Direktschall zu Nachhallpegel D/R am Zuhörerort.

Bestimmte Schlüsselparameter der akustischen Übertragungsqualität lassen sich also mit den entsprechenden Modellen tatsächlich hinreichend genau bestimmen.

Damit ist auch eine der Grundlagen für das subjektive Hörerlebnis, in diesem Fall das Verstehen, recht genau bestimmbar.

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Gültigkeitsbereiche der benutzten Modelle beachtet werden, die Eingangsparameter genügend genau sind und die Ergebnisse der Modellrechnung richtig interpretiert werden.

Folgt dann noch eine entsprechende Ausführung und Umsetzung, so sind insgesamt Ergebnisse zu erwarten, die nicht wesentlich von denen abweichen, wie sie aus den Modellrechnungen gewonnen wurden.
