

# Simulation von Beschallungsanlagen

Dipl.-Ing. (FH) Volker Holtmeyer

Die computergestützte Simulation von Raum- und Elektroakustik bietet die Möglichkeit, valide Aussagen über die zu erwartende Qualität eines geplanten Beschallungskonzepts zu machen, um ein hohes Maß an Planungssicherheit zu erlangen. Da die Umsetzung solcher Simulationen heutzutage vergleichsweise einfach geworden ist, sind für viele Planer solche Softwarelösungen als Begleiter ihrer täglichen Arbeit unverzichtbar geworden. Im Folgenden werden die grundsätzliche Funktionsweise und die Möglichkeiten der modernen raum- und elektroakustischen Simulation erläutert.

Um die räumliche und zeitliche Verteilung des Schalldruckes in einem Raum zu bestimmen, bedient man sich verschiedener Methoden. Nach den jeweils verwendeten Methoden unterteilt man die Raumakustik in eine wellentheoretische, eine geometrische und eine statistische Raumakustik.

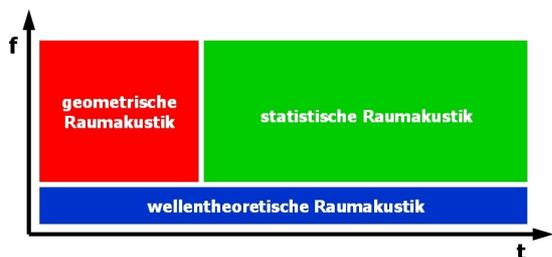


Abb. 1 Berechnungsmethoden der Raumakustik

Bei der wellentheoretischen Raumakustik wird die Ausbreitung des Schalls durch eine Differentialgleichung beschrieben. Die Aufstellung und Lösung dieser so genannten Wellengleichung stellt sich vergleichsweise schwierig dar und ist für den Planungsprozess einer Beschallungsanlage wenig praktikabel.

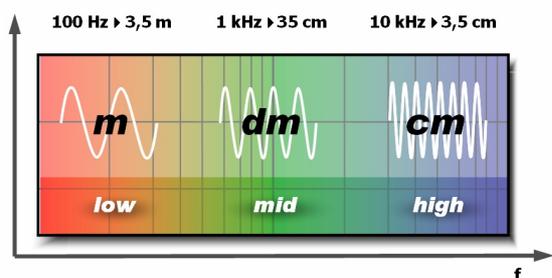


Abb. 2 Verhältnis der Wellenlängen für unterschiedliche Frequenzen

Da in typischen Beschallungssituationen die Raumabmessungen in der Regel aber groß gegenüber den betrachteten Wellenlängen sind, kann der Wellencharakter des Schalls hier vernachlässigt werden, weshalb sich übliche Simulationsprogramme lediglich auf geometrische und statistische Methoden beschränken. Zu den geometrischen Methoden zählen das Spiegelquellenverfahren und die Strahlenverfolgung.

## Spiegelquellenverfahren

Das Spiegelquellenverfahren ist darauf begründet, dass sich die an einer Wand reflektierte Energie

einer Schallquelle durch eine weitere Quelle darstellen lässt, deren Position quasi durch eine Spiegelung der ursprünglichen Quelle an der Wandfläche entstanden ist. Das Spiegelquellenverfahren kann man sich also sehr plastisch veranschaulichen, wenn man sich die Raumbegrenzungsflächen als optische Spiegel vorstellt, die eine milchige Färbung aufweisen, die den Absorptionseigenschaften entspricht.

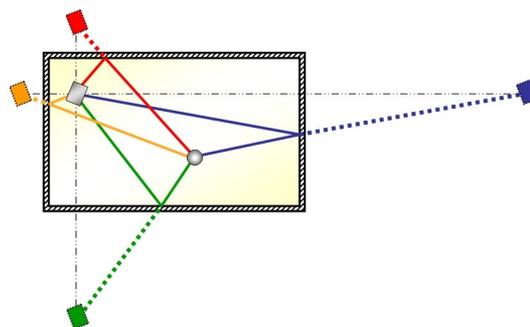


Abb. 3 Spiegelquellenverfahren mit vier gespiegelten Quellen 1. Ordnung

Bei der Reflexion erster Ordnung wird zunächst jede Quelle an jeder von ihr aus sichtbaren Begrenzungsfläche gespiegelt, wobei die Intensität der neuen Quellen entsprechend der Absorptionseigenschaften der Begrenzungsflächen und des Entfernungsgesetzes<sup>1</sup> (plus Luftabsorption) vermindert wird. Für die Reflexion zweiter Ordnung werden die nun entstandenen Spiegelquellen wiederum an allen von ihnen aus sichtbaren Begrenzungsflächen gespiegelt und so fort. Die Energie am Immissionsort ergibt sich schließlich aus der Überlagerung der Energie aller Quellen.

Bei diesem Verfahren steigt die Anzahl der Quellen exponentiell mit steigender Ordnung an. Für einen einfachen Raum mit 40 Flächen und zwei Quellen sind somit für den Direktschall zwei Quellen, für die erste Reflexion 80 Quellen, für die Reflexion 2. Ordnung immerhin schon 3.200 Quellen und für die Reflexion 3. Ordnung gar 128.000 Quellen zu berücksichtigen. Wie man sieht, steigt der Rechenaufwand damit sehr schnell an. Deshalb wird oft für höhere Ordnungen das Verfahren der Strahlenverfolgung (*engl.: Ray Tracing*) eingesetzt.

<sup>1</sup> Bei einer Punktschallquelle nimmt der Schalldruckpegel mit 6 dB pro Entfernungsverdoppelung ab.

### Strahlenverfolgung

Bei der Strahlenverfolgung werden strahlenförmig um die Schallquellen herum gewissermaßen Partikel ausgesandt und es wird berechnet, ob diese Partikel nach Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen den Empfängerpunkt treffen bzw. ihn nahe genug streifen, um als Treffer gewertet werden zu können. Die dort eintreffende Energie eines jeden Partikels ist nun wiederum entsprechend der zurückgelegten Wegstrecke (plus Luftabsorption) und den Absorptionseigenschaften der getroffenen Begrenzungsflächen vermindert.

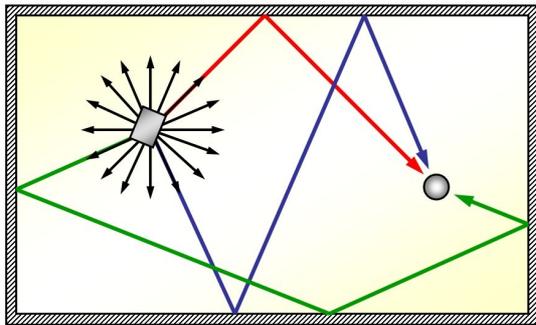


Abb. 4 Strahlenverfolgung mit je einer Reflexion 1. Ordnung (rot), 2. Ordnung (blau) und 3. Ordnung (grün)

Da die Anzahl der ausgesandten Strahlen aber nicht unendlich sein kann, wird nicht unbedingt jeder mögliche Pfad gefunden. Die mögliche Präzision ist linear abhängig von der Anzahl verfolgter Strahlen. Da die Strahlen mit zunehmender Laufzeit auseinanderstreben, ist die Trefferchance bei diesem Verfahren zusätzlich abhängig von Zeit bzw. zurückgelegter Wegstrecke. Sie ist hoch für kurze Laufzeiten und nimmt mit zunehmender Laufzeit kontinuierlich ab.

Bei der Strahlenverfolgung steigt der Rechenaufwand nur linear – näherungsweise mit der Anzahl der Flächen mal der gewählten Ordnung der Reflexion. Es ist jedoch in jedem Falle, ebenso wie beim Spiegelquellenverfahren, ein sehr hoher Rechenaufwand zu erwarten. Daher sind das Siegelquellenverfahren und die Strahlenverfolgung lediglich für einzelne Punkte im Auditorium anwendbar.

### Statistische Raumakustik

Bei der Planung von Beschallungsanlagen ist es aber wichtig, dass man beispielsweise bei einem Austausch eines Lautsprechertyps möglichst direkt die Auswirkungen für den gesamten Zuhörerbereich erfassen kann. Wenn die Zahl der aufeinander folgenden Reflexionen sehr groß ist, liefert die statistische Betrachtung hinreichend genaue Ergebnisse. Daher bietet sich für das grundlegende Design eines Beschallungskonzepts die statistische Raumakustik an.

Hier haben sich für die Darstellung der verschiedenen Berechnungsergebnisse so genannte Mappings bewährt. Dabei werden die einzelnen Werte farblich abgestuft auf zuvor definierten Flächen abgebildet werden – den so genannten Hörerflächen oder auch einfach Hörflächen. Dies bietet sich an, da sich die Ohren aller zu beschallen-

den Personen naturgemäß etwa alle in einer Ebene befinden. Für ein sitzendes Publikum hat sich eine Fläche mit einem Abstand von 1,20 m und für ein stehendes Publikum mit einem Abstand von 1,60 m zum Fußboden etabliert.

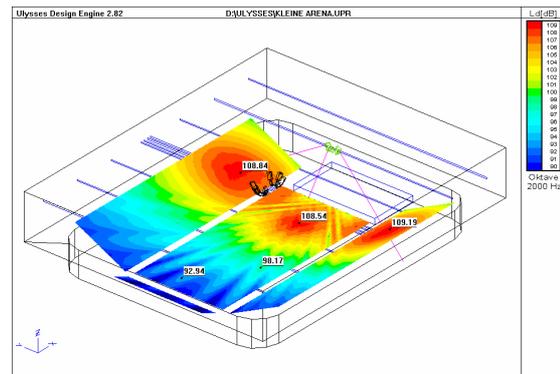


Abb. 5 Mapping des Direktschalldruckpegels

Wenngleich für die Berechnung des Direktschalls bereits eine bloße Hörfläche genügt, wird üblicherweise aber zunächst der eigentliche Raum als Drahtgittermodell gezeichnet, wobei die Verfahrensweise genau wie bei herkömmlichen CAD-Programmen ist. Es mag anscheinend nahe liegen, daher möglicherweise schon vorhandene Files eines Architekten zu importieren; die Praxis zeigt jedoch, dass diese meist viel zu komplex sind. Beispielsweise besteht eine Wand in einer Bauzeichnung aus zwei Linien oder es sind Details vorhanden, die aus akustischer Sicht belanglos sind. Somit ist die Modifikation einer solchen Zeichnung in der Regel aufwändiger, als das Modell komplett eigenständig zu zeichnen.

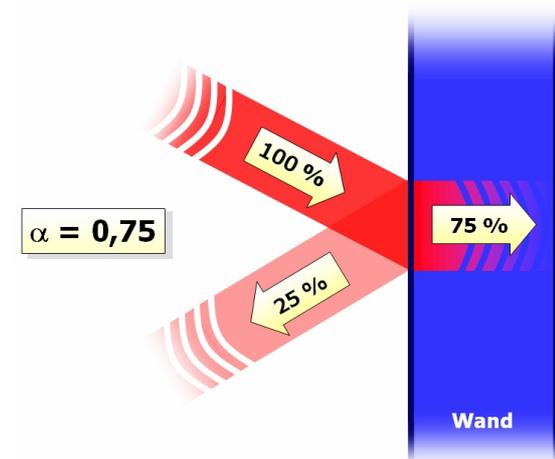


Abb. 6 Absorptionsgrad  $a$

Der nächste Schritt ist dann, die Flächen mit den entsprechenden Absorptionseigenschaften zu versehen. Diese werden definiert durch den frequenzabhängigen Absorptionsgrad  $a$ , der beschreibt, wie viel Energie von einer Begrenzungsfläche im jeweiligen Frequenzband absorbiert wird und einen Wert von 0 (keine Absorption) bis 1 (vollständige Absorption) annehmen kann.

Im Wesentlichen lassen sich die Absorptionseigenschaften in zwei Bereiche einteilen.

Zum Einen gibt es die porösen Absorber, bei denen die Absorption durch Reibungsverluste innerhalb des Materials geschieht, wobei der Absorptionsgrad typischerweise zu hohen Frequenzen hin ansteigt. Zum Anderen zeigen Resonanzabsorber wie etwa Plattenschwinger eine ausgeprägte Absorption lediglich im Bereich der Resonanzfrequenz.

Um das akustische Verhalten von Begrenzungsflächen vollständig zu beschreiben, wäre es korrekterweise nötig auch zu berücksichtigen, dass der Schall nicht immer in eine Richtung reflektiert wird, sondern ein Teil auch diffus gestreut wird. Diese Diffusion ist aber schwer zu bestimmen, weshalb bisher nur selten überhaupt Daten vorliegen. Wenn die Materialien im Modell aber relativ gleichmäßig verteilt sind, ist es ein guter Kompromiss, diffuse Eigenschaften völlig außer Acht zu lassen.

Ein weiterer Aspekt, der sich in Simulationsprogrammen schwer nachbilden lässt, sind Beugungseffekte. Gerade bei großen Wellenlängen wird der Schall um Hindernisse herum gebeugt, womit diese insbesondere für tiefe Frequenzen keine totale Abschattung darstellen. Beugungseffekte finden daher in der Regel gar keine Berücksichtigung.

Nachdem der Raum fertig modelliert ist, werden die Lautsprecher in das Modell eingebracht. Das räumliche Abstrahlverhalten von Lautsprechern wird mit so genannten Daten-Balloons dargestellt. Zur Aufnahme dieser Daten wird der Lautsprecher dreidimensional meist in einem 5°-Raster vermessen, wobei in erster Linie die Schalldruckpegel von Bedeutung sind und als Sensitivity-Werte<sup>2</sup> abgelegt werden.



Abb. 7 Messvorrichtung im ITA Aachen

In der Regel ist es hinreichend, den Phasengang der Lautsprecher außer Acht zu lassen, da dieser – bedingt durch das Verfahren der Datenaufnahme – ohnehin nur für ein einziges gedachtes akustisches Zentrum gilt. Tatsächlich wären die Abstände der akustischen Zentren der einzelnen Wandler einer Mehrwegebox für eine korrekte Berücksichtigung der Phase aber von essentieller Bedeutung. Ein weiterer Grund, den Phasengang zu vernachlässigen

ist gegeben, wenn ohnehin nur Lautsprecher gleichen Typs eingesetzt werden.

### Direktschallberechnung

Zur Berechnung untersucht das Programm nun jeden einzelnen Punkt einer Hörfläche und berechnet zunächst den Abstand zur nächsten Schallquelle. Mit dem Entfernungsgesetz kann ganz einfach ein Pegelverlust durch den entsprechenden Abstand ermittelt werden, wobei ggf. noch die Luftabsorption berücksichtigt wird. Um zu berechnen, welcher Direktschallpegel tatsächlich für diesen Punkt der Hörfläche gilt, wird noch untersucht, unter welchem Winkel die Schallquelle – und damit der zugehörige Daten-Balloon – zum Berechnungspunkt steht und der entsprechende Sensitivity-Wert zur Berechnung herangezogen.

Wird die Hörfläche von mehreren Quellen beschallt, so wird mit allen weiteren Quellen ebenso verfahren und die Werte werden entsprechend addiert. Diese Addition kann einfach energetisch oder nach Betrag und Phase erfolgen. Bei Letzterem werden Interferenzen durch Laufzeitunterschiede der unterschiedlichen Signale berücksichtigt, was in der Regel die realistischeren Ergebnisse bringt. Die reine energetische Addition sollte allenfalls bei komplett dezentralen Beschallungskonzepten (z.B. Deckeneinbaulautsprecher) verwendet werden.

### Gesamtschallberechnung

Um den Gesamtschalldruckpegel darzustellen, wird zusätzlich der Pegel des Diffusfeldes addiert. Letzterer wird rein statistisch aus der eingebrachten Gesamtenergie und der Nachhallzeit berechnet. Die frequenzabhängige Nachhallzeit selbst wird mit dem Volumen  $V$ , den Flächen  $S$  und den zugehörigen Absorptionsgraden  $a$  beispielsweise nach der Sabine'schen Nachhallformel berechnet.

$$RT_{60} = 0,163 \cdot \frac{V}{S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots}$$

Wie man sieht, ist die für diese statistische Betrachtung die tatsächliche Verteilung der Absorption im Raum irrelevant. Daher können die Nachhallzeiten bei den meisten Programmen alternativ auch kurzerhand direkt eingegeben werden. Das bietet sich vor allem an, wenn die Nachhallzeiten eines schon vorhandenen Raumes bereits messtechnisch erfasst wurden.

Wie vorangehend angedeutet, wird für den Pegel des Diffusfeldes davon ausgegangen, dass sich die von den Lautsprechern abgestrahlte Energie gleichmäßig im Raum verteilt. Dies ist hinreichend für Räume, die keine geometrischen Anomalien aufweisen und in denen die Absorption gleichmäßig verteilt ist. Bei einem langen flachen Raum, bei dem nur die Decke absorptiv ist, würde es beispielsweise Abweichungen geben; aber immer dahingehend, dass der Pegel des Diffusfeldes mit zunehmender Entfernung etwas abnimmt. Ebenfalls können mit den statistischen Methoden keine Fokussierungseffekte von konkaven Flächen erfasst werden. Nicht

<sup>2</sup> Die Sensitivity (bzw. Empfindlichkeit) gibt den Schalldruckpegel in einer Entfernung von 1 m bei einer Leistung von 1 W an.

zuletzt kann auch die absorptive Wirkung des Publikums zu ungenauen Ergebnissen der statistischen Methodik führen. Wenn nämlich stark richtend abstrahlende Lautsprecher eingesetzt werden und diese naturgemäß aufs Publikum ausgerichtet sind, wird ein Großteil der in den Raum abgestrahlten Energie bereits direkt vom Publikum absorbiert, wobei das statistische Nachhallfeld größer berechnet würde, als es tatsächlich ist.

### Reflektogramme

Wenn im konkreten Fall also die statistischen Verfahren zu große Kompromisse erkennen lassen, sollte die Beschallungssituation zusätzlich mit Verfahren der geometrischen Akustik untersucht werden. Mit dem Siegelquellenverfahren respektive der Strahlenverfolgung kann für einzelne Punkte im Raum ein Reflektogramm (engl.: *Energy Time Curve, ETC*) erstellt werden, das den zeitlichen Verlauf der Energie darstellt.

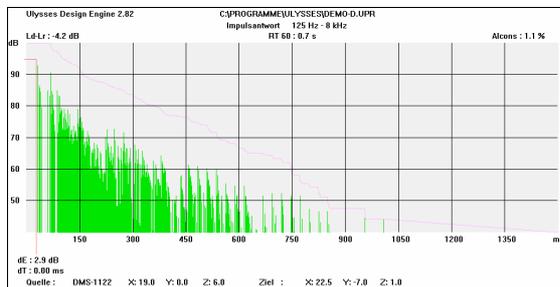


Abb. 8 Reflektogramm (ETC)

Damit ist es möglich, die Nachhallzeit alternativ zur statistischen Berechnung zu bestimmen. Ebenfalls lassen sich im Reflektogramm beispielsweise späte Reflexionen ausmachen, die als störende Echos wahrgenommen werden.

### Auralisation

Darüber hinaus kann ein Reflektogramm als Grundlage für eine so genannte Auralisation dienen. Dabei wird die Impulsantwort abgeleitet, die dann mit einer Tonaufnahme gefaltet werden kann. Somit erhält die Tonaufnahme die akustischen Eigenschaften des simulierten Hörerortes, was gleichsam das Hineinhören in den Raum ermöglicht.

Durch die limitierte Rechartiefe der Berechnungsmethoden ist die Qualität gerade bei Räumen mit langen Nachhallzeiten natürlich stets eingeschränkt. Gelegentlich wird eine solche Aufnahme zusätzlich mit einem statistisch ermittelten Nachhallschwanz ergänzt, um der Realität näher zu kommen. In jedem Fall aber lässt sich eine solche Aufnahme nutzen, um etwa die Charakteristiken unterschiedlicher Beschallungsvarianten zu vergleichen und um eventuelle Echos oder andere Artefakte aufzuspüren.

### Sprachverständlichkeit

Weitere wichtige Ergebnisse einer raum- und elektroakustischen Simulation sind Werte für die Sprachverständlichkeit wie STI und %AL<sub>Cons</sub>. Der STI (Speech Transmission Index) wird prinzipiell messtechnisch ermittelt, während sich der %AL<sub>Cons</sub>

(Articulation Loss of Consonants in %) im Wesentlichen aus dem Verhältnis der Pegel von Direktschall und Diffusfeld berechnen lässt. Die Werte für den %AL<sub>Cons</sub> lassen sich in Werte für den STI überführen, so dass auch Mappings mit STI-Werten möglich sind.

$$\%AL_{CONS} = \frac{200 \cdot D_x^2 \cdot RT_{60}^2 \cdot N}{V \cdot Q}$$

Abstand Lautsprecher-Zuhörer
Nachhallzeit
„Anzahl“ der Quellen (D/R Leistungsverhältnis)

Raumvolumen
Bündelungsfaktor

Der %AL<sub>Cons</sub> kann gleichermaßen nach statistischen wie auch nach den geometrischen Methoden berechnet werden, wobei die bestimmenden Faktoren in erster Linie der Abstand des Lautsprechers zum Zuhörer und die Nachhallzeit sind. Des Weiteren spielen das Raumvolumen und die Bündelungseigenschaften des Lautsprechers eine Rolle.

### Fazit

Bei der Planung einer Beschallungsanlage ist die Ermittlung der Direktschallpegelverteilung das wichtigste Kriterium. Alle anderen Ergebnisse sind maßgeblich abhängig vom Verhältnis der Pegel von Direktschall und Diffusfeld. Daher ist das aufschlussreichste Resultat das Mapping des Direktschallpegels.

Um diffusfeldabhängige Parameter wie die Sprachverständlichkeit zu berechnen, gibt die statistische Betrachtung meist einen guten Überblick mit einer hinreichenden Genauigkeit. Bei eher ungewöhnlichen Räumen, die besondere Geometrien oder sehr ungleichmäßig verteilte Absorption aufweisen, ist es ratsam Methoden der geometrischen Raumakustik wie das Spiegelquellenverfahren und die Strahlenverfolgung anzuwenden. Hierbei werden die Eigenarten des Raumes besser berücksichtigt, aber es lässt sich jeweils nur ein einziger Punkt berechnen.