

# Beschallung von großen Räumen

Bachelorarbeit

durchgeführt von

Paco Langjahr

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

Leiter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Kubin

Begutachter/Betreuer: DI Thorsten Rohde

Graz, im Januar 2011

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Problematik bei der Beschallung von großen sehr halligen Räumen mit Sprachsignalen erläutert. Zur Erfassung der Akustik eines Raumes wird zuerst eine Zusammenfassung über die relevanten akustischen Gütemaße gegeben. Anschließend werden die Möglichkeiten der computergestützten Simulation besprochen und es werden Lösungsansätze erläutert, wie die Raumakustik und die Beschallungsanlage eines großen Raumes in Bezug auf bessere Sprachverständlichkeit optimiert werden kann. Im letzten Kapitel werden verschiedene Versuche unternommen, ein trockenes Sprachsignal derart zu bearbeiten, dass es nach dem Durchlaufen eines sehr halligen akustischen Systems besser verstanden wird.

## Abstract

In the present thesis the issue of acoustic irradiation of large and very reverbant rooms with speech signals is diskussed. To capture the acoustic characteristics of a room there is at first a summary about the relevant acoustic parameters. Subsequent the possibilities of computer based simulation are discussed and solutions are presented, how the acoustics and the public address system of a large room can be optimized regarding a better speech intelligibility. In the last chapter several trials are made to treat a dry speech signal in a way, that it can be understood better after running through a highly reverbant acoustic system.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	4
<b>2. Raumakustische Gütemaße</b> .....	5
2.1 Nachhall T .....	5
2.2 Bassverhältnis BR .....	6
2.3 Deutlichkeitsmaß C50 .....	6
2.4 Artikulationsverlust Alcons .....	6
2.5 Sprachübertragungsindex STI, RASTI und STI-PA .....	7
<b>3. Computergestützte Simulation</b> .....	8
<b>4. Akustische Lösungsansätze</b> .....	10
4.1 Reflektoren und Absorber .....	10
4.1.1 Reflektoren .....	10
4.1.2 Absorber .....	11
4.2 Beschallungsanlage .....	14
<b>5. Digitale Optimierungsversuche</b> .....	15
5.1 Frequenzgang .....	16
5.2 Dynamik .....	17
5.3 Zeitliche Komponente .....	18
5.4 Kombination der Effekte .....	18
5.5 Korrelation der subjektiven Effekte mit objektiven Messmethoden ..	18
<b>6. Zusammenfassung</b> .....	21
<b>7. Quellenverzeichnis</b> .....	22

## 1. Einleitung

Die Beschallung von großen Räumlichkeiten stellt nach wie vor ein sehr komplexes Problem dar, für das es bis heute keine All-in-One Lösung gibt. Die Aufgabe dieser Arbeit ist es deshalb, zuerst einmal die verschiedenen Probleme bei der Beschallung großer Räume zu erfassen und Ursachen zu erläutern. Dabei liegt das Interesse ausdrücklich in der Beschallung mit Sprachsignalen, also in der Steigerung der Sprachverständlichkeit. Im Alltag gibt es eine Vielzahl von Situationen, wo eine Steigerung der Sprachverständlichkeit dringend erforderlich ist, beispielsweise ist sie bei Notfallwarnsystemen überlebenswichtig. Soll dieses z.B. in einem Straßentunnel installiert werden, so sieht sich der Planer der Beschallungsanlage mit teilweise über 30 s Nachhallzeit und Störpegeln von mehr als 90 dBA konfrontiert. Eine Lösung ist hier nur über sequentielle Beschallung oder Übertragung per Verkehrsfunk möglich.

Ebenfalls mit sehr hohen Störschallpegeln hat man es bei der Stadionbeschallung zu tun, auch hier sind Werte von 95 dBA nicht unüblich. Auch wenn die Nachhallzeit hier moderater ausfällt als beim vorherigen Beispiel (meist einige Sekunden), so ist eine gute Sprachverständlichkeit trotzdem aufgrund der hohen Störpegel kaum zu erreichen.

In den beschriebenen Fällen ist ein raumakustischer Ansatz meistens nur schlecht möglich, da entweder geeignete Plätze zur Anbringung von Absorbern fehlen, diese zu kostspielig oder optisch nicht erwünscht ist. Somit bleiben zum Einen die Optimierung der Beschallungsanlage und zum Anderen die Möglichkeit der digitalen Bearbeitung des Sprachsignals, welche den praktischen Teil dieser Arbeit darstellt. Dabei soll das trockene Sprachsignal durch Effekte/Filter etc. so vorbereitet werden, dass es hinterher auch in Räumen mit extremen Nachhallzeiten noch verstanden werden kann.

## 2. Raumakustische Gütemaße

### 2.1 Nachhallzeit T

Die Nachhallzeit eines Raumes ist die älteste Größe zur Kennzeichnung der akustischen Eigenschaften eines Raumes. Definitionsgemäß bezeichnet sie die Zeit, in der die Energie einer gerade abgeschalteten Schallquelle auf ein Millionstel des Anfangswertes bzw. -60 dB abgesunken ist. Da es oft schwer möglich ist, den vollen Dynamikumfang von 60 dB zu erreichen und der Hörer dem Abklingen des Schallereignisses ebenfalls nur bis zum äußeren Störgeräuschpegel folgen kann, wird die Nachhallzeit meist zwischen -5 und -35 dB gemessen und dann extrapoliert. Befragungen zur Nachhallzeit haben ergeben, dass der anfängliche Pegelabfall besser mit der subjektiven Empfindung der Zuhörer übereinstimmt. Aus diesem Grund definiert man eine frühe Nachhallzeit EDT (Early Decay Time), welche den Pegelabfall von 0 bis -10 dB beschreibt und außerdem je nach Position im Raum variiert, während die „eingeschwungene“ Nachhallzeit T platzunabhängig ist.

Nach Eyring (1930) hängt die Nachhallzeit im Wesentlichen vom Volumen des Raumes und von seinen schallabsorbierenden Eigenschaften ab:

$$T = 0,163 \frac{V}{-\ln(1 - \bar{\alpha})S_{ges} + 4mV} \tag{2.1}$$

$\bar{\alpha} = A_{ges} / S_{ges}$  : räumlich gemittelter Absorptionsgrad

$A_{ges}$  : gesamte Absorptionsfläche in  $m^2$

$S_{ges}$  : gesamte Raumboberfläche in  $m^2$

$m$  : Energiedämpfungskonstante der Luft in  $m^{-1}$

Dabei entspricht  $A_{ges}$  der Fläche, die ein offenes Fenster mit derselben Absorption hätte.

Zur Messung der Nachhallzeit verwendet man heute meist die sog. Schröder-Rückwärtsintegration. Dabei muss die Raumimpulsantwort bekannt sein. Da die Nachhallzeit eine frequenzabhängige Größe ist, wird für jedes Terz- oder Oktavband die Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort durchgeführt:

$$r^2(t) = const \cdot \int_t^\infty h(\tau)^2 d\tau \tag{2.2}$$

Der Sollwert für Sprachwiedergabe beträgt im Frequenzbereich von 250 Hz bis 2000 Hz zwischen 0,8 und 1,2 Sekunden und kann zu den Frequenzenden auch weniger betragen. Dieser Richtwert ist in folgendem Diagramm dargestellt:

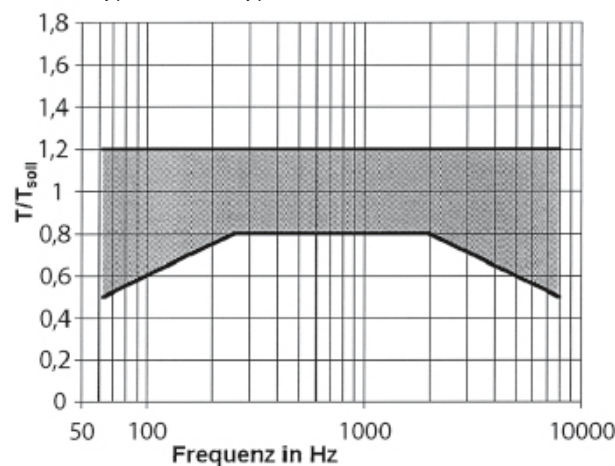


Abb. 2.1: Sollwert des Nachhalls für Sprachwiedergabe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Diagramm entnommen aus [1]

## 2.2 Bassverhältnis BR

Das Bassverhältnis beschreibt die Klangfarbe des Nachhalls und sollte für eine gute Sprachverständlichkeit höchstens 1,0 bis 1,3 betragen. Es errechnet sich aus dem Verhältnis der Nachhallzeiten bei Oktavmittenfrequenzen von 125 und 250 Hz zu den Oktavmittenfrequenzen 500 und 1000 Hz:

$$BR = \frac{T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}}{T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}} \quad (2.3)$$

## 2.3 Deutlichkeitsverhältnis $C_{50}$

Da frühe Energie im Zeitbereich von 50ms nach dem Direktschall die Verständlichkeit von Sprache erhöht, lässt sich aus dem Verhältnis früher Energie zur Gesamtenergie ein Maß für die Deutlichkeit von Sprache formulieren:

$$C_{50} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \text{ dB} \quad (2.4)$$

Eine sehr gute Sprachverständlichkeit ist bei mindestens 2 dB gewährleistet, als unterer Grenzwert für eine gute Verständlichkeit wird -3 dB angesehen.

## 2.4 Artikulationsverlust $Al_{\text{cons}}$

Nach Peutz (1971) kann der Artikulationsverlust von Sprache durch eine empirische Formel beschrieben werden, welche eine Funktion der Nachhallzeit  $T$ , des Raumvolumens  $V$  und des Abstandes zur Schallquelle  $r_{\text{QH}}$  ist:

$$Al_{\text{cons}} \approx 0,625 \left( \frac{r_{\text{QH}}}{r_{\text{H}}} \right)^2 \cdot T\% \quad (2.5)$$

Der Artikulationsverlust lässt sich auch durch das Verhältnis der Direktschallenergie bis 35 ms zur Nachhallenergie nach 35 ms ausdrücken:

$$Al_{\text{cons}} \approx 0,625 \left( \frac{E_{\infty} - E_{35}}{E_{35}} \right) \cdot T\% \quad (2.6)$$

Es ist offensichtlich, dass der Artikulationsverlust mit größerem Nachhall und größerer Entfernung von der Schallquelle zunimmt.

Als Richtwert für den  $Al_{\text{cons}}$  kann folgende Tabelle verwendet werden, welche auf subjektiven Befragungen beruht:

$Al_{\text{cons}} \leq 3\%$	ideale Verständlichkeit
$Al_{\text{cons}} = 3 \dots 8\%$	sehr gute Verständlichkeit
$Al_{\text{cons}} = 8 \dots 11\%$	gute Verständlichkeit
$Al_{\text{cons}} > 11\%$	befriedigende Verständlichkeit
$Al_{\text{cons}} > 20\%$	unbrauchbare Verständlichkeit (Grenzwert 15%)

Tab. 2.1: Richtwerte des  $Al_{\text{cons}}$

## 2.5 Sprachübertragungsindex STI, RASTI und STI-PA

Der Speech Transmission Index ist eine Messmethode, um die allgemeine Tauglichkeit eines Raumes zur Sprachübertragung zu beurteilen. Dabei wird das Sprachsignal als relativ breitbandiges Rauschen zwischen 125 Hz und 8 kHz angenommen, welches durch die sog. Phonemfrequenzen von 0,63 Hz bis 12,5 Hz moduliert wird. Man modelliert also ein Quasi-Sprachsignal um 7 Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz und moduliert diese im Terzabstand mit 14 Phonemfrequenzen. Somit erhält man 98 Sprachsignale, mit denen nun über die Modulationsübertragungsfunktion MTF (Modulation Transfer Funktion) jeweils die Abnahme des Modulationsgrades ermittelt wird:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi F \cdot \frac{T}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\left(\frac{S/N}{10dB}\right)}} \quad (2.7)$$

Die nun vorliegenden Modulationsreduktionsfaktoren werden verwendet, um die scheinbaren Signal-Störabstände  $X_i$  zu berechnen:

$$X_i = 10 \log\left(\frac{m_i}{1 - m_i}\right) dB \quad (2.8)$$

Anschließend wird für jedes Oktavband über alle 14 Modulationsfrequenzen gemittelt und nach folgender Formel die Modulationsübertragungsindices berechnet:

$$MIT = \frac{\bar{X} + 15}{30} \quad (2.9)$$

Die 7 erhaltenen Werte werden letztendlich frequenzabhängig nach Tab. 2.2 gewichtet. So ergibt sich der STI als Einzahlwert.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
w	0,02	0,05	0,13	0,2	0,31	0,28	0,03

Tab. 2.2: Gewichtungsfaktoren zur Bildung des STI

Schröder (1981) konnte nachweisen, dass sich die STI-Werte auch aus der gemessenen Impulsantwort des Raumes berechnen lassen:

$$\underline{m}(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) \cdot e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.10)$$

Dies wird heutzutage bei den meisten computergestützten Messverfahren bevorzugt, da es einen deutlich geringeren Messaufwand darstellt, als 98 verschiedene Testsignale ausspielen zu müssen. Ein deutlich vereinfachtes Verfahren stellt das RASTI-Messverfahren dar, welches 1988 u.A. von der Firma Brüel u. Kjaer entwickelt wurde. Es verwendet anstatt sieben nur zwei Oktavbänder und nur 9 statt 14 Modulationsfrequenzen. Das Verfahren wird jedoch inzwischen kaum noch verwendet, da es mit der Rechenleistung moderner Computer kein Problem mehr ist, das STI-Verfahren durchzuführen, welches genauere Ergebnisse liefert.

Ein weiteres vereinfachtes, aber sehr aktuelles und genaues Verfahren ist das STI-PA (Speech Transmission Index for Public Address Systems), welches von der Firma Bose und TNO entwickelt wurde. Beim STI-PA wird die MTF aus allen 7 Frequenzbändern bestimmt. Die 14 Modulationsfrequenzen werden dann jedoch auf die 7 Frequenzbänder verteilt, so dass jedes Frequenzband mit zwei Frequenzen moduliert wird. Dabei werden alle 7 modulierten Frequenzbänder von einem STI-PA Generator gleichzeitig wiedergegeben. So ist eine sehr schnelle Messung möglich, welche wesentlich genauer ist als die RASTI-Messung.

### 3. Computergestützte Simulation

Aufgrund der rasanten Weiterentwicklung der Computertechnik können viele Probleme bei der akustischen Planung zur ersten Abschätzung in einem Computermodell simuliert werden. Lösungsansätze können somit ausprobiert werden, sogar eine subjektive Einschätzung des Klangergebnisses ist dank Auralisationsfunktion möglich. Da bei neueren Gebäuden die geometrischen Raumpläne bereits in digitaler Form vorliegen, können diese zudem in manchen Fällen direkt in der entsprechenden Simulationssoftware übernommen werden. In anderen Fällen, in denen z.B. die Auflösung des vorliegenden geometrischen Modells zu hoch ist und das Modell Details enthält, welche akustisch keinerlei Relevanz haben und unnötig die Rechenzeiten erhöhen, ist es einfacher, das Modell anwendungsorientiert neu zu erstellen. Alle Flächen werden dabei durch Materialangaben wie Absorptionsgrad ergänzt. All dies sind natürlich nur Näherungen, z.B. werden Beugungseffekte und winkelabhängige Absorptionsgrade meist vernachlässigt, somit kann absolute Sicherheit der akustischen Gegebenheiten letztendlich nur durch Messung erreicht werden.

Heutige Beschallungssimulationen bieten verschiedenste Möglichkeiten der Schallquellenwahl, so kann je nach Anwendungszweck ein einfacher Punktrahler, ein komplex zusammengesetzter Punktrahler oder auch ein ganzes Line Array simuliert werden. Dabei werden sowohl Phaseninformationen als auch Interferenzerscheinungen zwischen verschiedenen Schallquellen berücksichtigt. Besondere Wichtigkeit hat hierbei heutzutage die Simulation von DSP-gesteuerten Line Arrays, welche durch digitale Ansteuerung der einzelnen Module unterschiedliche Richtwirkungen erreichen. Zu diesem Zweck lassen sich in der entsprechenden Simulationssoftware sogenannte Dynamic Link Libraries importieren, in denen sämtliche Ansteuerungsparameter des DSP-Arrays gespeichert sind und simuliert werden können. Der Clou dabei ist, dass der Planer bestimmte Richtwirkungen des Arrays in der Simulation ausprobieren kann und bei guten Ergebnissen die bei der Simulation verwendeten Steuerungsparameter in die reale Arrayansteuerung importieren kann.

Abbildung 3.1 zeigt die Simulation eines DSP-gesteuerten Line Arrays, welches für eine Entfernung von 30 m von der Zeile ausgelegt ist. Die Simulationsfrequenz beträgt 2 kHz. Da ein Line Array prinzipiell die versuchte Annäherung an einen idealen Linienstrahler darstellt, lässt sich die Entfernung zur Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  und der Länge  $l$  der Linie ansetzen bei:

$$r = \frac{l^2 \cdot f}{2c} \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnet die Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld jene Entfernung, ab der die Richtcharakteristik der Schallquelle als Schalldruckpegel in Abhängigkeit eines horizontalen und vertikalen Neigungswinkels beschrieben werden kann. Wird dieser Abstand unterschritten, so überlagern sich die durch verschiedene Bereiche des Strahlers erzeugten Schalldrücke in so komplexer Form, dass sie nicht mehr durch eine winkelabhängige Richtcharakteristik beschrieben werden können.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3.1 leicht nachzuvollziehen. Bei einem Abstand von 8 m zur Schallzeile bleibt die gewünschte Richtcharakteristik vollständig erhalten (wenn auch mit entfernungsbedingt stärkerem Pegel), bei nur einem Meter Abstand wird jedoch die durch (3.1) beschriebene Grenze von ca. 4 m unterschritten und die Zeilenwirkung geht verloren.



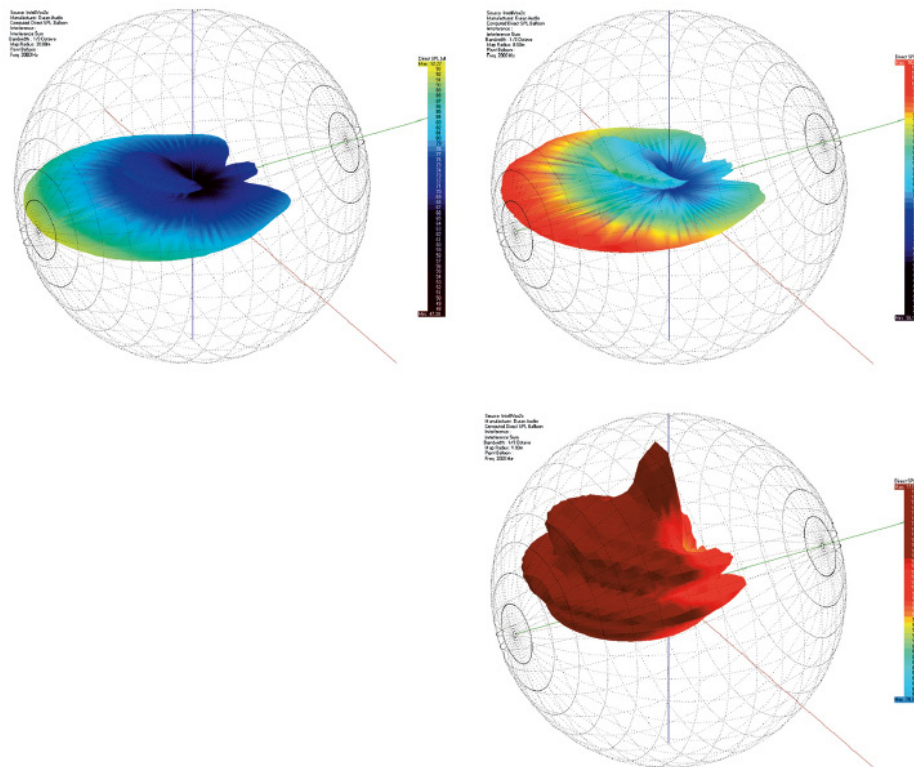


Abb. 3.1: Betragballon einer digitalen Schallzelle (Duran Audio DC280) bei  $f=2000$  Hz in verschiedenen Entfernungen von 30 m (oben links), 8 m (oben rechts) und 1 m (unten)<sup>2</sup> Mittlerweile ist es möglich, ganze Impulsantworten auf der Grundlage raumakustischer Simulationsdaten zu berechnen und daraus die verschiedensten akustischen Gütemaße abzuleiten. Das Ergebnis der Berechnungen kann dann beispielsweise als sogenannte Mapping-Darstellung ausgegeben werden:

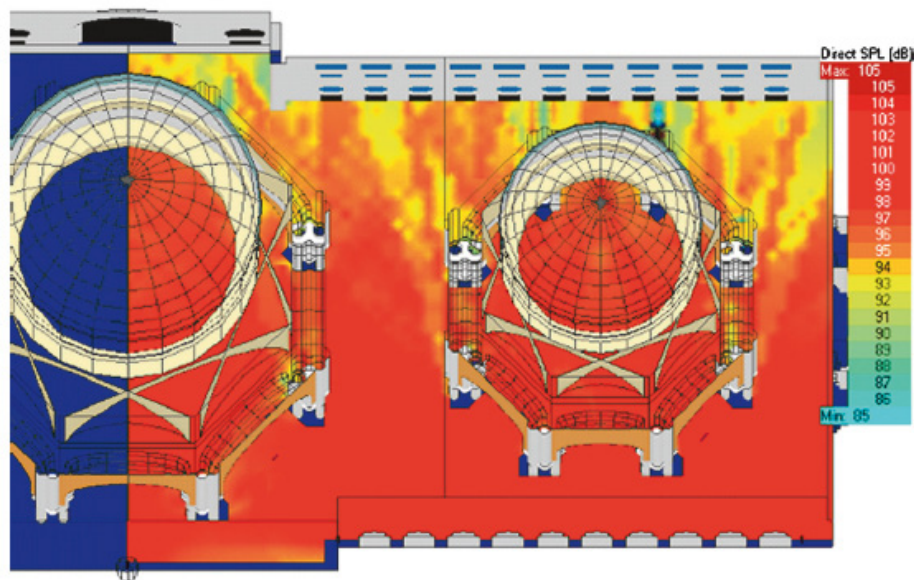


Abb. 3.2: Mapping-Darstellung für den Direktschallpegel über der Hörerfläche, visualisiert als Farbverlauf auf einem Abschnitt des Grundrisses einer Moschee. Überlagert eine 3D-Ansicht von zwei der drei Kuppeln des Raummodells.<sup>3</sup>

<sup>2, 3</sup> Grafiken entnommen aus [1]

Aus diesen Mapping-Darstellungen können die Parameter zur Sprachverständlichkeit wie STI abgeleitet werden. Ebenfalls möglich ist wie bereits erwähnt die Auralisation des simulierten Raumes. Dazu muss zuerst eine monaurale Raumübertragungsfunktion berechnet werden. Diese wird dann für alle Einfallrichtungen mit HRTFs (Head Related Transfer Function) multipliziert, um eine binaurale Übertragungsfunktion zu erhalten, welche dann nur noch in den Zeitbereich zurücktransformiert werden muss, um die Impulsantwort des Raumes zu erhalten. Diese kann dann mit nachhallfreien Audiosignalen wie Sprache oder Musik gefaltet und über Kopfhörer abgespielt werden, um einen akustischen Eindruck des Ergebnisses zu erhalten. Dennoch muss noch einmal betont werden, dass die Computersimulation durch diverse Vernachlässigungen, welche beispielsweise Beugungseffekte, Streuungsverhalten an Wänden oder nur teilweise vorhandene Strahlerdaten insbesondere natürlicher Schallquellen betreffen nur eine Annäherung an die reale Situation darstellt und nicht als alleiniges Entscheidungskriterium zur Veränderung eines Raumes dienen sollte.

## 4. Akustische Lösungsansätze

Um die Sprachverständlichkeit eines Raumes zu beeinflussen, ist die Veränderung der Raumakustik mit gezielten Maßnahmen die wohl direkteste Herangehensweise. Hierzu bieten sich je nach vorhandenen akustischen Eigenschaften des Raumes verschiedene Optionen, welche sich grob in zwei Kategorien unterteilen lassen. Die erste Kategorie beinhaltet die Reflexion des Schalls in verschiedensten Weisen und Frequenzbereichen, die zweite die Absorption des Schalls in verschiedenen Frequenzbereichen.

### 4.1 Reflektoren und Absorber

#### 4.1.1 Reflektoren

Bei der Schallreflexion an Begrenzungsflächen lassen sich wiederum je nach Wellenlänge der auftreffenden Schallwelle und Abmessung der reflektierenden Oberfläche drei Kategorien unterscheiden. Diese sind in Abbildung 4.1 verdeutlicht:

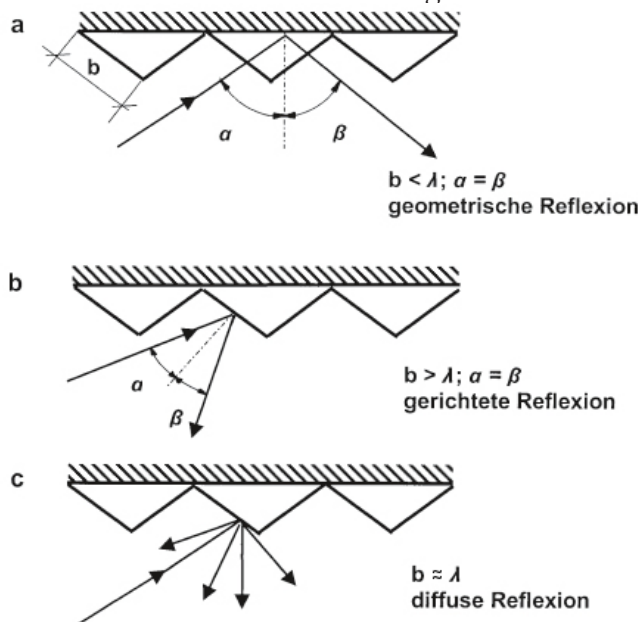


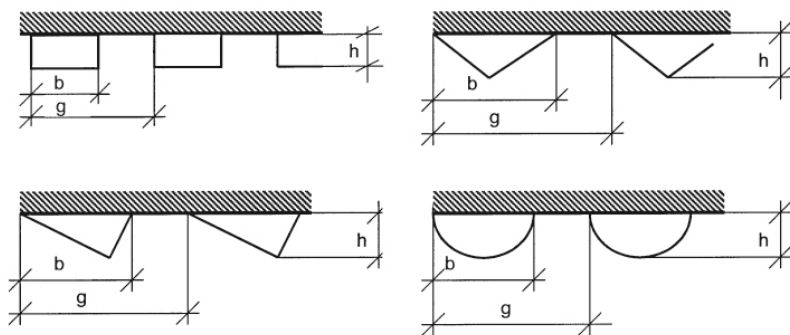
Abb. 4.1: verschiedene Möglichkeiten der Schallreflexion<sup>4</sup>

4 Zeichnungen entnommen aus [1]

Im Fall a (geometrische Reflexion) ist die Wellenlänge größer als die Abmessung der reflektierenden Oberfläche und der Schall wird gemäß dem Reflexionsgesetz der Optik reflektiert: Der Ausfallswinkel ist gleich dem Einfallswinkel des Schalls, jedoch erfolgt die Reflexion hinter dem Reflektor an der Begrenzungsfläche. Im Fall b wird der Schall ebenfalls nach dem Strahlengesetz reflektiert, hier jedoch an der entsprechenden Reflektorfläche. Im dritten Fall entspricht die Abmessung der reflektierenden Fläche ca. der Wellenlänge der eintreffenden Welle und es findet diffuse Reflexion statt. Je nach Anwendungsfall und Frequenz wird einer dieser Fälle angestrebt. Die geometrischen Abmessungen eines Reflektors müssen also exakt auf die zu reflektierende Frequenz bzw. Wellenlänge abgestimmt werden, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Ebenso muss die Masse des Reflektors bezogen auf die Fläche zur möglichst verlustfreien Reflexion bestimmte Grenzwerte einhalten. Diese liegen für Sprache bei ca. 10 kg pro m<sup>2</sup> für optimale Ergebnisse, bei Einschränkungen durch kritische Statik (oft werden reflektierende Flächen über der Darbietungszone benötigt und müssen somit dort aufgehängt werden) können auch 7 kg pro m<sup>2</sup> angesetzt werden.

Für eine möglichst schallstreuende Wirkung muss außerdem die Struktur des Diffusors an die gewünschte Bandbreite angepasst werden. Während eine Rechteck- oder Dreiecksstruktur relativ schmalbandig schallstreuend wirkt (ca. 1 Oktave bei Rechteck- und 2 Oktaven bei Dreiecksstrukturen), sind für breitbandige Schalldiffusion beispielsweise Zylindersegmente vorteilhaft. Eine Übersicht der je nach Wellenlänge benötigten Strukturperioden, -Höhen und -breiten bietet folgende Tabelle:

Struktur	Strukturperiode $g$	Strukturbreite $b$	Strukturhöhe $h$
Rechteck	$\approx (1 \dots 2)\lambda$	$\approx 0,2g$	$\approx 0,2g$
gleichschenkliges Dreieck	$\approx (1 \dots 2)\lambda$	$\approx (0,5 \dots 0,67)g$	$\approx (0,25 \dots 0,33)g$
Sägezahn	$\approx 2\lambda$		$\approx 0,33\lambda$
Zylindersegment	$\approx (1 \dots 2)\lambda$	$\approx (0,17 \dots 1,0)g$	$\approx (0,25 \dots 0,5)g$



Tab. 4.1 und Abb. 4.2: verschiedene Diffusorstrukturen<sup>5</sup>

#### 4.1.2 Absorber

Schallabsorbierende Maßnahmen können aus zweierlei Gründen erfolgen: Zum einen kann damit Störschall entweder von oder nach außen abgeschottet werden und zum anderen (für diese Arbeit relevant) die akustischen Eigenschaften eines Raumes frequenzselektiv verändert werden. Dabei unterscheidet man prinzipiell je nach Frequenzbereich Tiefen-, Mitten-, Höhen- und Breitbandabsorber. Als Maß für die Eignung eines Absorbers dient dabei primär der frequenzabhängige Absorptionsgrad  $\alpha$  bzw. die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$ . Bei der Wirkungsweise schallabsorbierender Maßnahmen gibt es zwei Kategorien: Schallabsorber, welche auf der Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie durch poröse Materialien beruhen und solche, welche auf dem Resonanzprinzip beruhen (Helmholtz-Resonatoren, Platten- und Membranabsorber).

<sup>5</sup> 5 Zeichnungen entnommen aus [1]

Bei porösen Absorbern hängt der erreichte Absorptionsgrad im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab: von der Porosität des Materials, dem Strukturfaktor des Materials, dem spezifischen Strömungswiderstand des Materials, der Schichtdicke des Absorbers und der Frequenz der eintreffenden Schallwelle.

Die Porosität  $\sigma$  des Materials bezeichnet das Verhältnis des in den Poren eingeschlossenen Luftvolumens zum Gesamtvolumen des Absorbers und sollte möglichst groß sein. Gute Absorber haben eine Porosität um 0,8. Da jedoch durch im Material vorhandene „Sackgassen“, welche z.B. parallel zur Oberfläche verlaufen, nicht alle Porengänge akustisch wirksam sind, wird ein Strukturfaktor  $s$  eingeführt, welcher das Verhältnis des Gesamtporenvolumens zum akustisch wirksamen Porenvolumen bezeichnet. Es ist offensichtlich, dass der Strukturfaktor größer gleich 1 sein muss.

Der spezifische Strömungswiderstand sollte weder zu groß noch zu klein sein, denn bei zu großem Strömungswiderstand würde der Absorber wie eine schallharte Wand wirken und die eintreffende Schallwelle würde vollständig an der Absorberoberfläche reflektiert werden. Bei zu kleinem Strömungswiderstand hingegen würde der Absorber akustisch unsichtbar und die Schallwelle würde an der dahinter liegenden Wand schallhart reflektiert werden. Es leuchtet ein, dass der Strömungswiderstand also in einem bestimmten Bereich liegen muss, als Richtwert zur optimalen Anpassung an die Schallkennimpedanz der Luft kann hier folgende Formel angegeben werden:

$$800 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \leq R_s \frac{\sigma}{\sqrt{s}} \leq 2400 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \quad (4.1)$$

Die optimale Schichtdicke eines Absorbers hängt wiederum von dem zu absorbierenden Frequenzbereich ab. Abbildung 4.3 zeigt den resultierenden Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz der eintreffenden Schallwelle und der Schichtdicke des Absorbers:

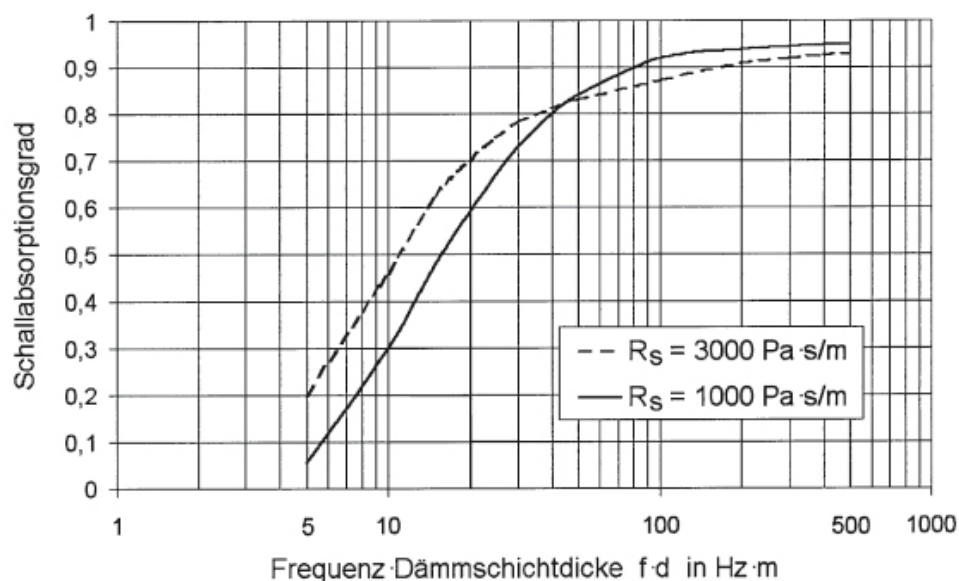


Abb. 4.3: Schallabsorptionsgrad poröser Absorber in Abhängigkeit von Frequenz und Schichtdicke<sup>6</sup>

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass prinzipiell bei hohen Frequenzen und Schichtdicken der Schallabsorptionsgrad eines porösen Absorbers ansteigt. Außerdem ist zu erkennen, dass für gute Absorptionswerte bei tiefen Frequenzen sehr große Schichtdicken erforderlich werden. Für den spezifischen Strömungswiderstand gilt, dass bei kleineren Schichtdicken ein höherer und für große Schichtdicken ein geringerer Strömungswiderstand gefordert ist.

<sup>6</sup> Diagramm entnommen aus [1]

Platten- Folien- und Helmholtz-Absorber arbeiten alle nach dem Resonanzprinzip. Dabei bildet der Absorber durch seinen Aufbau ein Feder-Masse-System, welches dem Schallfeld bei einer bestimmten Resonanzfrequenz Energie entzieht. Beim Platten- oder Folienabsorber ist eine dünne Platte bzw. Folie, welche die Masse des Systems bildet, in einem definierten Abstand zu einer starren Wand angeordnet. Das Luftpolster zwischen der Wand und der schwingenden Platte bildet durch seine Steifigkeit zusammen mit der Biegesteifigkeit der Platte die Feder des Systems. Die Dämpfung des Systems wird durch den Verlustfaktor des Plattenmaterials und die Reibungsverluste an den Einspannstellen bestimmt, die Resonanzfrequenz ist abhängig von der flächenbezogenen Masse  $m'$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] der Platte und dem Abstand  $d_L$  [m] der Platte von der starren Wand und berechnet sich näherungsweise zu:

$$f_R \approx \frac{60}{\sqrt{m' \cdot d_L}} \quad (4.2)$$

Der Absorptionsgrad eines solchen Plattenabsorbers beträgt je nach Resonanzgüte bei der Resonanzfrequenz zwischen 0,3 und 0,4 und kann durch eine zusätzliche Bedämpfung des Luftpolsters auf 0,4 bis 0,7 gesteigert werden. Im Oktavabstand zur Resonanzfrequenz beträgt der Absorptionsgrad ca. die Hälfte. Dabei sollte der Abstand  $d_L$  der Platte wesentlich kleiner sein als die Wellenlänge des zu absorbierenden Schalls.

Beim Helmholtz-Resonator bildet ein Luftvolumen  $V$  beliebiger Form durch seine Steifigkeit die Feder des Resonanzsystems, die akustische Masse besteht aus einer Luftmasse in einem Halsloch mit der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$ . Abbildung 4.4 zeigt einen solchen Absorbereaufbau:

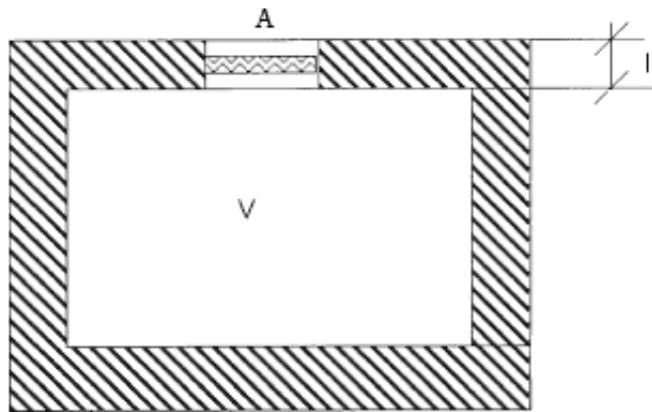


Abb. 4.4: Skizze eines Helmholtz-Absorbers<sup>7</sup>

Die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Absorbers berechnet sich mit  $\Delta l = 0,85 \cdot r$  zu:

$$f_R = 2\pi \sqrt{\frac{A}{V(l + 2\Delta l)}} \quad (4.3)$$

Häufig werden Helmholtz-Absorber verwendet, welche einen ähnlichen Aufbau wie ein Plattenabsorber haben, jedoch mit einer eng gelochten Platte versehen sind. Dadurch ergibt sich automatisch eine Vielzahl von Helmholtzabsorbern, welche nebeneinander angeordnet sind. Dabei bilden die Luftmassen in den Löchern die akustische Masse, während bei einem Plattenabsorber die Platte selbst die akustische Masse darstellt. Zur Realisierung breitbandiger Schallabsorber sind unterschiedliche Lochparameter, unterschiedliche Dicken des Luftpolsters und kombinierte Absorbereaufbauten aus mehreren Lochplatten möglich.

<sup>7</sup> Zeichnung entnommen aus [1]

## 4.2 Beschallungsanlage

Bei großen und somit für diese Arbeit relevanten Räumen mit langer Nachhallzeit sind je nach Anwendungszweck raumakustische Maßnahmen, wie sie im vorherigen Kapitel besprochen wurden nur geringfügig oder gar nicht möglich, beispielsweise ist die Anbringung von flächendeckenden Absorbieren in Kirchen meist eher unerwünscht.

Jedoch bietet oft die Beschallungsanlage selbst erhebliches Verbesserungspotential. In Bezug auf die Sprachverständlichkeit ist anzustreben, möglichst viel Direktschall zum Zuhörer zu bringen und den Nachhall so wenig wie möglich anzuregen. Dies erreicht man am besten durch wenige Lautsprecher mit starker Richtwirkung, da mit steigender Anzahl der Lautsprecher auch die Anregung des Nachhalls ansteigt und die unterschiedlichen Laufzeiten der einzelnen Schallquellen durch Laufzeitkorrekturgeräte kompensiert werden muss. Ein solches Beschallungskonzept lässt sich einerseits mit Hornlautsprechern realisieren, den aktuellen Stand der Technik stellen jedoch moderne DSP-Arrays dar, auf welche hier auch speziell eingegangen werden soll, da sie einige Vorteile insbesondere in der Beschallung von Kirchen bieten.

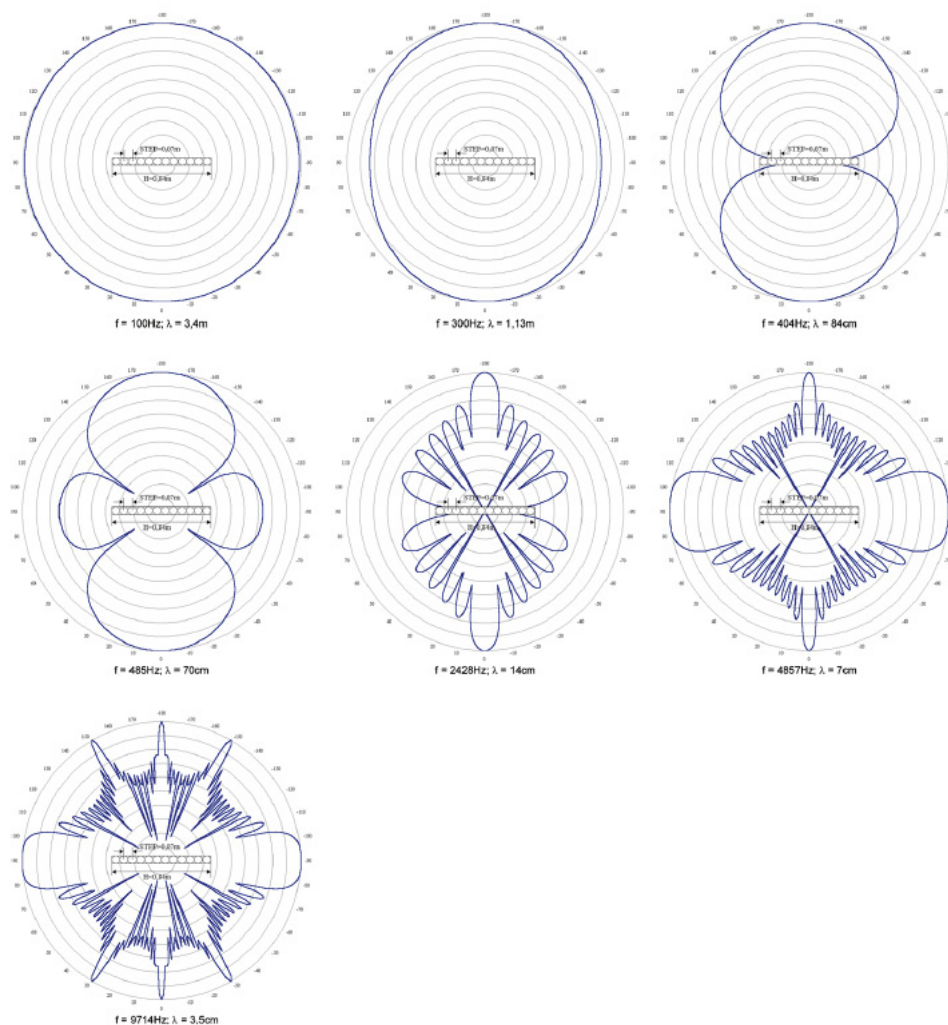


Abb. 4.5: Simulation der Richtcharakteristik von 12 Punktquellen bei verschiedenen Frequenzen<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Grafik entnommen aus [1]

Die Richtwirkung einer Lautsprecherzeile nimmt normalerweise mit der Frequenz kontinuierlich zu. Abb. 4.5 zeigt die simulierte Richtwirkung einer Lautsprecherzeile mit 12 Punktschallquellen im Abstand von 7 cm bei sieben verschiedenen Frequenzen. Die Breite des Amplitudenrasters beträgt 6 dB. Man sieht, dass die Lautsprecherzeile sich bei tiefen Frequenzen wie eine einzelne Punktschallquelle verhält und sich mit zunehmender Frequenz immer mehr Nebenkeulen ausbilden.

Um dies zu kompensieren, versucht man bei Lautsprecherzeilen im Allgemeinen, für hohe Frequenzen die Länge des Arrays zu verkleinern, indem einzelne Lautsprecher schrittweise abgeschaltet werden, da sich durch eine Verringerung der Länge der Lautsprecherzeile auch die Richtwirkung verringert. Früher wurde diese Anpassung der Richtcharakteristik durch elektronische Filter realisiert, heute wird dank der rasanten Weiterentwicklung der DSP-Technik jeder Lautsprecher der Zeile mit einer eigenen Endstufe und einer DSP-Einheit ausgestattet, welche neben der Anpassung der Zeilenlänge durch Tiefpassfilterung auch die flexible Steuerung einer Vielzahl weiterer Filterparameter erlaubt. So lässt sich z.B. der Öffnungswinkel oder die Neigung der Richtkeule extern steuern.

#### 4. Digitale Optimierungsversuche

Anhand einer Sprachaufnahme sollen im Rahmen dieser Arbeit die prinzipiellen Möglichkeiten der digitalen Vorbearbeitung eines Signals zur Beschallung von großen Räumen erläutert werden. Dabei handelt es sich prinzipiell um ein gänzlich anderes Problem, als es die Enthaltung von Aufnahmen stellt. Für letzteres gibt es ein paar kommerzielle Plugins, welche mehr oder weniger gut funktionieren. Das Sujet dieser Arbeit ist jedoch die Vorbereitung des trockenen Signals bei vorgegebenem (sehr halligen) Raum zur Steigerung der Sprachverständlichkeit.

Zu diesem Zweck wurde zuerst eine kleine Sprachaufnahme mit einem einfachen (qualitativ nicht sehr hochwertigen) Mikrofon über den Mikrofoneingang einer gewöhnlichen OnBoard-Soundkarte gemacht. Um den Extremfall zu simulieren, hat sich der Verfasser für das Szenario einer Notfalldurchsage in einem Autobahntunnel entschieden, da hier wohl von allen realen Beschallungssituationen die widrigsten akustischen Verhältnisse anzutreffen sind. Der Text der Aufnahme lautet: „Achtung Feuer. Bitte verlassen Sie umgehend Ihr Fahrzeug und folgen Sie den Fluchtwegmarkierungen zum nächsten Notausgang. Bitte folgen Sie den Anweisungen des Löschpersonals.“ Die trockene Ansage ist unter [original\\_dry.wav](#) gespeichert.

Zur Verhallung des Signals wurde zunächst ein algorithmischer Hall verwendet, um das o.g. „worst case“-Szenario zu simulieren. Anschließend wurde der getestete Effekt jeweils auch auf eine Verhallung mit echter Impulsantwort einer Turnhalle angewendet, welche zwar durch eine „unzureichende“ Nachhallzeit von „nur“ 4,5 sec. das Sprachsignal nicht wirklich unverständlich machte, dafür jedoch eher den Anspruch der Natürlichkeit erfüllt.

Die Parameter des algorithmischen Halls wurden auf die längstmögliche Nachhallzeit eingestellt (Parameter sind in Abb. 5.1 sichtbar).

Mit dieser Einstellung wurde die Lautsprecheransage tatsächlich ziemlich unverständlich, was in der Datei [original.wav](#) dokumentiert ist. In [original\\_ir.wav](#) ist die „moderatere“ Verhallung mit echter Impulsantwort zu hören.

Um nun die Sprachverständlichkeit wieder zu verbessern lassen sich im Wesentlichen drei Parameter des trockenen Signals verändern:

1. Die Tonhöhe, bzw. der Frequenzgang des Signals
2. Die Lautstärke, bzw. die Dynamik des Signals
3. Zeitliche Komponenten wie Abspielgeschwindigkeit etc.

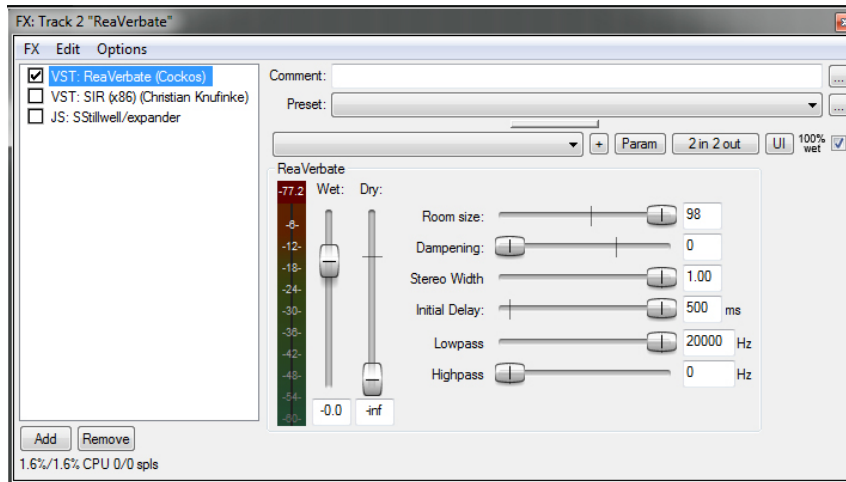


Abb. 5.1: Parametereinstellung des verwendeten Halls

### 5.1 Frequenzgang

Folgende Abbildung zeigt ein Diagramm zur Verteilung der Frequenzbereiche menschlicher Sprache:

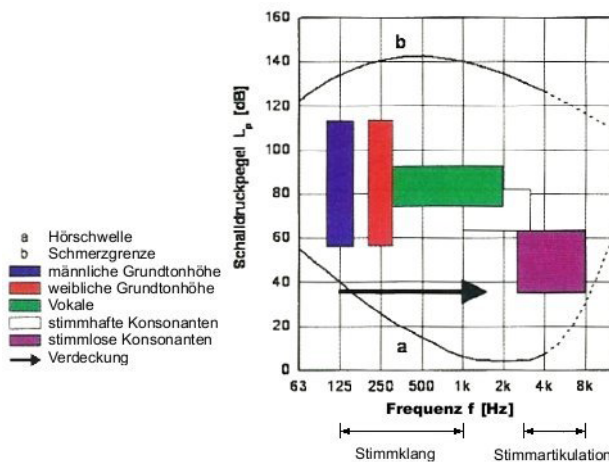


Abb. 5.2: Frequenzverteilung von Sprache<sup>9</sup>

Da unterhalb von ca. 100 Hz und oberhalb von ca. 8 kHz keine Anteile der menschlichen Sprache vorhanden sind, leuchtet es ein, die Bandbreite des Signals mindestens auf diesen Bereich zu beschränken, da jede zusätzliche Anregung des Nachhalls unerwünscht ist. Da zur Informationsübertragung hauptsächlich die Konsonanten Wichtigkeit haben, ist außerdem eine Bedämpfung der Frequenzen unterhalb von 200 Hz wünschenswert. Die Einstellung eines parametrischen Equalizers mit diesen Werten brachte bereits eine wesentliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit, was in [eq.way](#) angehört werden kann. Auch bei der Verhallung durch die echte Impulsantwort wird die Sprache besser verständlich (siehe [eq\\_ir.way](#)).

Eine weitere Möglichkeit zur Sprachverständlichkeitssteigerung kann in bestimmten Fällen der Einsatz eines Exciters sein. Dieser mischt dem ursprünglichen Signal bestimmte Oberwellen hinzu und macht das Signal so brillanter, was sich bei Sprache in prägnanteren Konsonanten zeigt. Dabei muss jedoch abgewägt bzw. ausprobiert werden, ob die nun deutlicheren Zischlaute die gesprochenen Wörter wirklich verständlicher macht oder den Nachhall unnötig anregt, was zu mehr Störpegel und somit Maskierungseffekten führt. Bei Verwendung des algorithmischen Halls war letzteres der Fall und die Sprachverständlichkeit nahm noch weiter ab ([exciter.way](#)). Bei der natürlichen Impulsantwort kann man jedoch eine Verbesserung der Verständlichkeit beobachten: [exciter\\_ir.way](#).

<sup>9</sup> Grafik entnommen aus <http://www.trikustik.at/wissen/optimale-raumakustik.html>



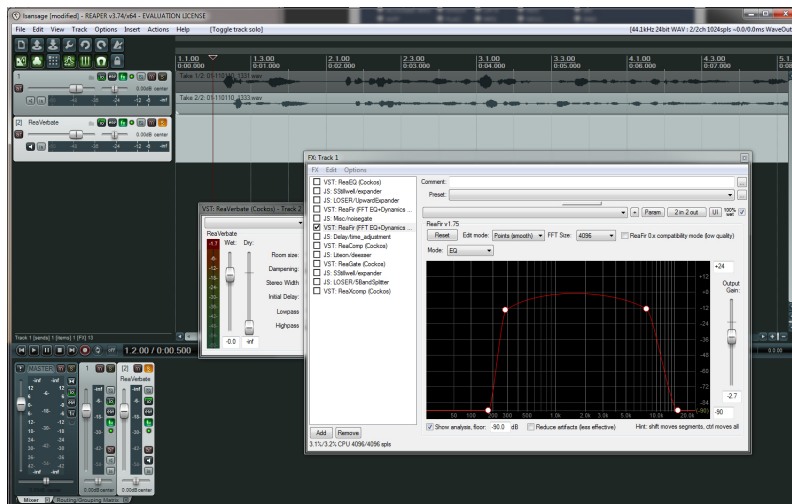


Abb. 5.3: Parametereinstellung des verwendeten Equalizers

## 5.2 Dynamik

Durch die sehr lange Nachhallfahne kommt es zu Maskierungseffekten, wenn leise Passagen auf laute Impulse folgen. Aus demselben Grund sind Expander, welche leise Störgeräusche unhörbar machen würden, hier absolut wirkungslos, da die Störgeräusche ohnehin von der Hallfahne überdeckt werden. Die Dynamik muss also eingeschränkt werden, wenn möglich sollte alles ungefähr denselben Pegel haben, um die Maskierung der leisen Wörter zu reduzieren.

Somit kam im hier dokumentierten Versuch ein Kompressor zum Einsatz. Die Einstellung der Parameter erfolgte dabei rein experimentell und hat sich durch subjektive Hörtests auf folgende Werte eingependelt:

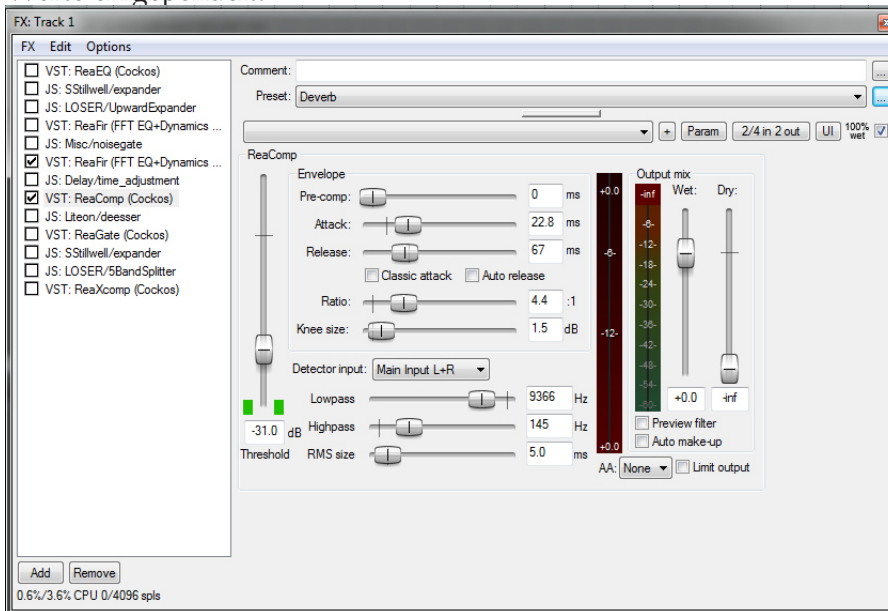


Abb. 5.4: Parametereinstellung des verwendeten Kompressors

Das Ergebnis für den algorithmischen Hall ist in `compressor.wav` zu hören, das für die natürliche Impulsantwort in `compressor_ir.wav`. Bei beiden ist eine deutliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit zu hören.

### 5.3 Zeitliche Komponente

Durch zeitliche Dehnung des Signals lässt sich die Sprachverständlichkeit geringfügig verbessern, durch das Einfügen von Pausen sogar signifikant. Jedoch ist eine Beschallung in Echtzeit dann nicht bzw. nur eingeschränkt möglich. Die zeitliche Dehnung ist dabei heutzutage sehr einfach und ohne Veränderung der Tonhöhe möglich, ebenso ist die Berechnung in Echtzeit kein Problem. Der Effekt der besseren Verständlichkeit ist dabei jedoch eher nicht auf der akustischen, sondern auf der psychologischen Ebene zu begründen, da das Nachhallfeld ja auch bei langsamer Wiedergabe des Signals insgesamt in gleichem Maße angeregt wird. Jedoch hat der Zuhörer bei langsamer Wiedergabe für die einzelnen Wörter mehr Zeit und kann somit durch logische Kombination mehr verstehen. Audiobeispiele für das zeitlich gedehnte Signal sind unter [timestretch.wav](#) und [timestretch\\_ir.wav](#) zu hören.

Ein weiterer Ansatz, welcher die Sprachverständlichkeit erheblich steigert ist das Einfügen von Pausen. Die Idee dahinter ist, dass in den Pausen Zeit für die Hallfahne ist, welche somit nicht die Folgewörter verdecken kann. Dabei gibt es bei kurzen Durchsagen natürlich die Möglichkeit, diese Pausen gleich bei der Aufnahme durch den Sprecher einzufügen. Ist dies aus welchen Gründen auch immer nicht möglich, könnten diese Pausen (wenn auch nicht in optimaler Weise) auch nachher eingefügt werden. Leider gibt es für diese Methode kein fertiges Plugin, dieses zu programmieren wäre aber sicher ein interessantes Projekt für eine Folgearbeit. Es gibt jedoch für die einzelnen Bausteine, welche dazu benötigt werden, durchaus automatisierte Möglichkeiten. Zuerst einmal braucht man ein Spracherkennungstool, welches erkennt, an welchen Stellen Wörter enden. Sind diese Stellen gefunden, so lassen sich dort relativ leicht Pausen einfügen, somit wird der gesprochene Text „zerstückelt“. Das Ergebnis dieser Behandlung findet sich in [pausen.wav](#) sowie in [pausen\\_ir.wav](#) für die natürliche Impulsantwort. Die Verbesserung der Verständlichkeit ist nach Meinung des Verfassers allen bisher besprochenen Methoden der digitalen Vorverarbeitung überlegen.

### 5.4 Kombination der Effekte

Eine Kombination der besprochenen Effekte ist nicht in jedem Fall zu empfehlen und muss individuell ausprobiert werden. Wenn zum Beispiel bei algorithmischer Verhallung der Kompressor mit beiden Zeitdehnungsmethoden kombiniert wird und anschließend noch der Equalizer hinzugefügt wird, wirkt letzterer eher störend, da hier insbesondere Wortenden wie das „en“ bei „folgen“ eher weggefiltert werden. Dies ist in den Audiobeispielen [kombination\\_ohne\\_eq.wav](#) und [kombination\\_mit\\_eq.wav](#) zu hören. In den meisten Fällen ist jedoch eine Kombination der Effekte unproblematisch.

### 5.5 Korrelation der subjektiven Effekte mit objektiven Messmethoden

Als Abschluss der vorliegenden Arbeit wurde noch ein Versuch unternommen, die hier dargestellten Sprachverständlichkeitsverbesserungsmöglichkeiten durch Effekte mit STI Messwerten zu belegen. Dabei war zunächst der Grundgedanke, eine virtuelle Impulsantwort aus dem algorithmischen Halleffekt zu erzeugen, indem statt des trockenen Sprachsignals ein exponentieller Sinussweep eingespielt wird. Das resultierende Signal wurde mit dem inversen Sweep gefaltet. Aus der nun erhaltenen Impulsantwort lassen sich die STI-Werte per Schröder-Rückwärtsintegration (siehe Formel 2.10) errechnen. Zum Vergleich der berechneten Nachhallzeiten und STI-Werte der virtuellen Impulsantwort des algorithmischen Halls und der echten Impulsantwort der Turnhalle sind auf der nächsten und übernächsten Seite die jeweiligen Plots abgebildet.

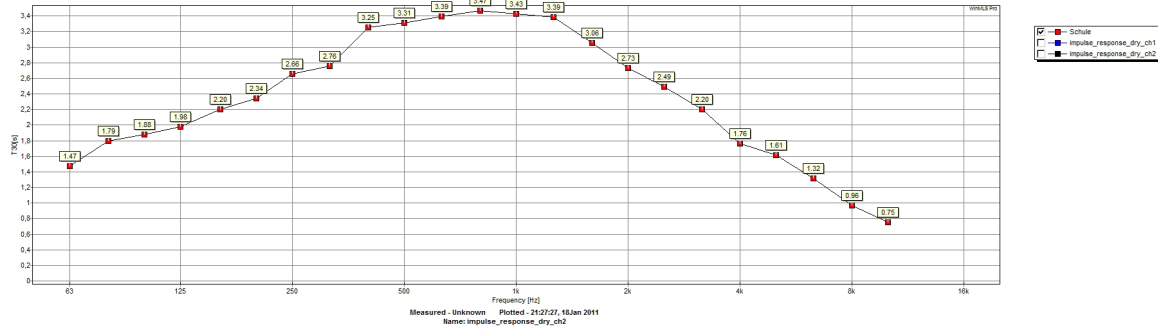


Abb. 5.5: Nachhallzeit der echten Impulsantwort einer Turnhalle

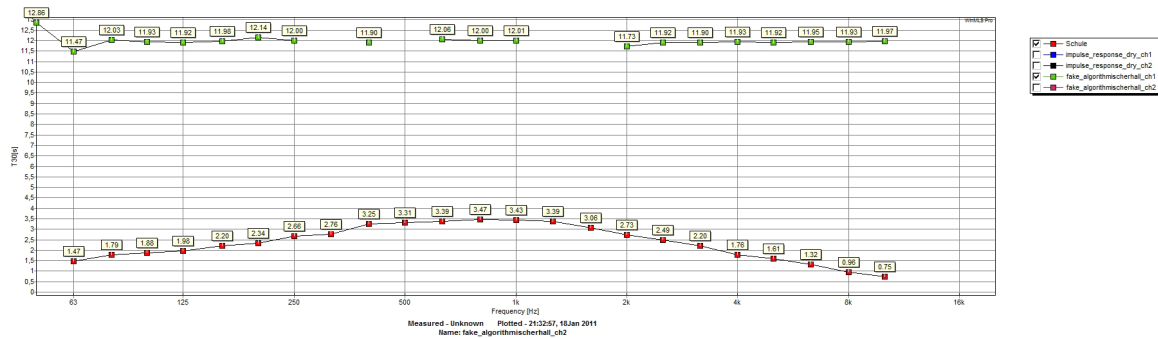


Abb. 5.6: Vergleich der Nachhallzeiten zwischen echter Impulsantwort (Turnhalle) und virtueller Impulsantwort (algorithmischer Hall)

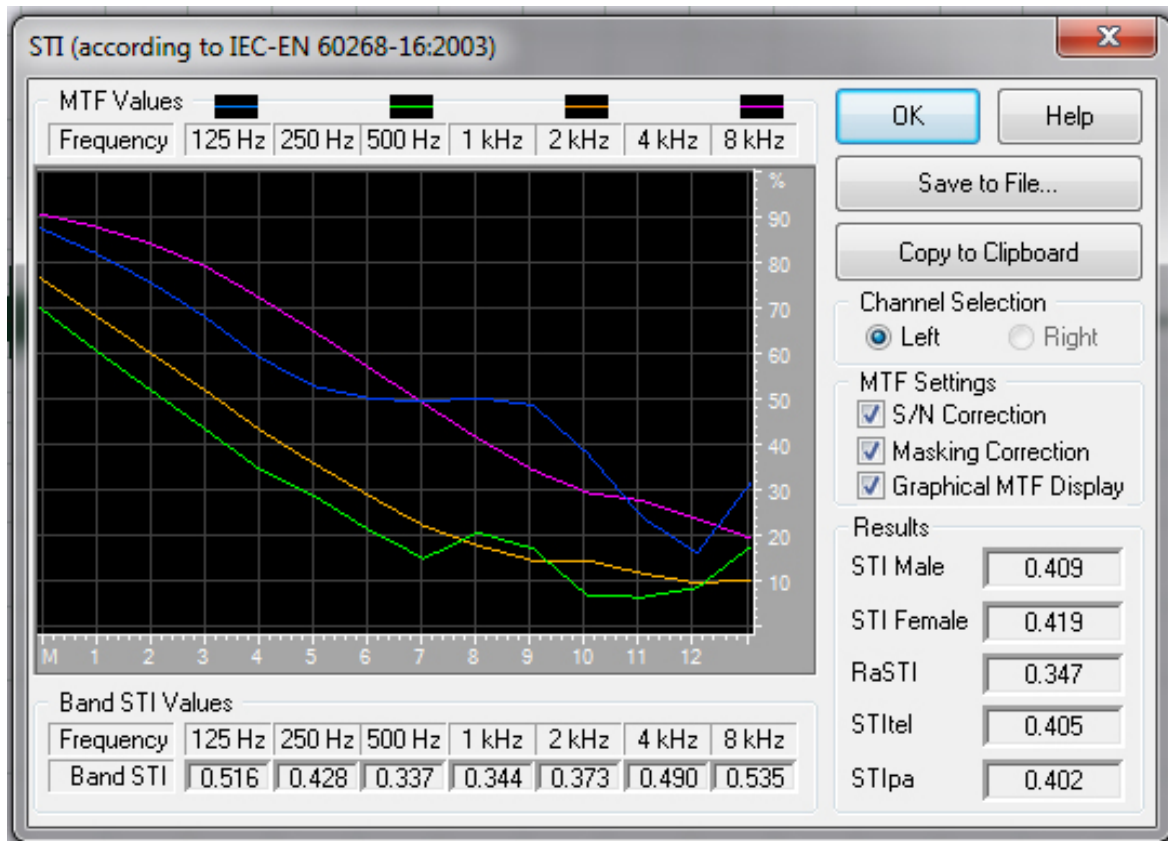


Abb. 5.7: berechnete STI-Werte der Impulsantwort einer Turnhalle

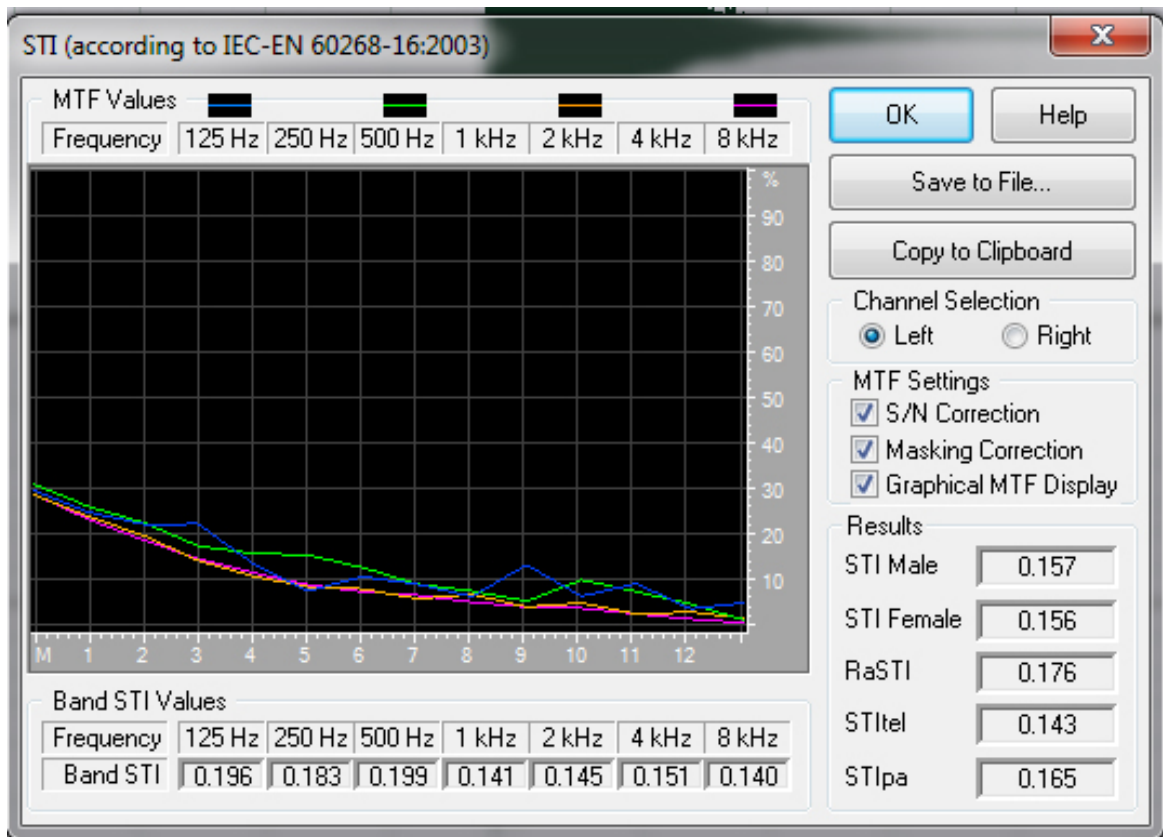


Abb. 5.8: berechnete STI-Werte der virtuellen Impulsantwort eines algorithmischen Halleffekts

Aus den Abbildungen 5.5 bis 5.8 erkennt man, dass die Nachhallzeiten des algorithmischen Halls gleichmäßig über das gesamte Audio-Frequenzband verteilt sind und wesentlich höher sind als bei der Impulsantwort der Turnhalle. Dieses Ergebnis war vorherzusehen und stimmt mit den subjektiven Eindrücken überein. Ebenso sind die STI-Werte des algorithmischen Halls wesentlich schlechter, was ebenfalls mit den subjektiven Eindrücken korreliert.

Jegliche Versuche, die STI-Werte durch Effekte, welche subjektiv eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit brachten, zu verbessern, indem das Anregungssignal (also der exp. Sinussweep) mit ebendiesen Effekten versehen wurde, scheiterte jedoch. Es gab hierbei keinerlei Korrelation zwischen der subjektiven Verbesserung der Sprachverständlichkeit und der Verbesserung der STI-Werte, was zu dem Schluss führt, dass diese Art der Messung der STI-Werte nicht zielführend bzw. mit konzeptionellen Fehlern behaftet ist. Eine Entwicklung einer geeigneten Messmethode zur Evaluierung der subjektiven Ergebnisse mit objektiven Messwerten bleibt also als sicher interessante Forschungsfrage bestehen.

## 6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die grundsätzlichen Probleme bei der Beschallung von großen Räumen mit Sprachsignalen dargelegt und verschiedene Lösungsansätze für spezifische Problemstellungen erarbeitet. Dabei steht an erster Stelle die Erfassung des Problems (lange Nachhallzeiten, große Störpegel etc.). Zur Vorerfassung der Möglichkeiten eignet sich in jedem Fall die computergestützte Simulation. Diese bietet auch ein mächtiges Werkzeug zur effektiven Kostenabschätzung bzw. -vermeidung, indem es unwirksame aber evtl. kostspielige Maßnahmen schon im Voraus als solche entlarvt. Sofern die Einbringung von Absorbern bzw. Reflektoren möglich und vom Auftraggeber erwünscht ist, kann diese also zuerst simuliert und bei Erfolg anschließend umgesetzt werden.

Auch wenn keine Maßnahmen zur Veränderung der Raumakustik möglich sind, so kann in vielen Fällen zumindest die Beschallungsanlage optimiert werden, um den Direktschall an möglichst vielen Stellen des Raumes zu erhöhen und die Anregung des Nachhalls zu minimieren. Moderne DSP-Arrays sind dabei heute bei modernen Beschallungsanlagen der Standard, da mit ihnen die Richtcharakteristik individuell angepasst werden kann.

Die Motivation für diese Arbeit war jedoch die digitale Vorbereitung des Signals, um in trotz sonstiger beschallungstechnischer Maßnahmen schlechten akustischen Bedingungen die Sprachverständlichkeit bei der Beschallung weiter zu steigern. Das fünfte Kapitel gibt deshalb einen praxisorientierten Überblick über die Möglichkeiten, das Sprachsignal durch Effekte so zu verändern, dass es nach der Verhallung durch den Raum immer noch einigermaßen verständlich ist. Dazu wurden eine Reihe von Audiobeispielen angefertigt, um die erreichten Verbesserungen dem Leser hörbar zu machen. Dabei muss je nach Beschallungssituation individuell entschieden werden, welche Kombination der Effekte in welchem Maße einen positiven Effekt erzielt.

## 7. Quellenverzeichnis

(1) Stefan Weinzierl

„*Handbuch der Audiotechnik*“

Springer Verlag, Berlin

1. Auflage, 2008

(2) Michael Möser

„*Technische Akustik*“

Springer Verlag, Berlin

7. Auflage, 2007

(3) Werner Weselak u. Gerhard Graber

„*Raumakustik Skriptum*“

Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz

Version 5.1

(4) Alois Sontacchi

„*Raumakustische Grundlagen*“

Institut für Elektronische Musik, Kunstuni Graz

<http://iem.at/~sontacchi/beschallung/Raumakustische%20Grundlagen.pdf>

(5) Anselm Goertz

„*Planung und Installation von Beschallungsanlagen unter Mithilfe moderner Simulationswerkzeuge und Messtechnik*“

PDF von Anselm Goertz persönlich erhalten

(6) Anselm Goertz

„*Planung und Simulation von Beschallungsanlagen für Kirchengebäude*“

Institut für Akustik und Audiotechnik

[http://www.ifaa-akustik.de/files/pls-msc-vortrag-25\\_03\\_2010-a\\_goertz.pdf](http://www.ifaa-akustik.de/files/pls-msc-vortrag-25_03_2010-a_goertz.pdf)

(7) Abb. 5.2 von <http://www.trikustik.at/wissen/optimale-raumakustik.html>

Verwendete Software:

Verhallung der Signale und Implementierung der Effekte: REAPER v. 3.74/x64

Einbindung der natürlichen Impulsantwort: SIR Plugin v. Christian Knufinke

Spracherkennung u. Einfügen von Pausen: Adobe Soundbooth CS4

Analyse der Impulsantworten: WinMLS sowie „Aurora“ Plugin für Adobe Audition

Erstellung der schriftlichen Arbeit: Microsoft Word 2007 sowie Adobe InDesign CS5