

# Diplomarbeit

Mag. Philipp M. Krejci

## Entwicklung eines Mehrkanaligen Systems für eine virtuelle Raumakustik

Durchgeführt am

**Institut für Elektronische Musik und Akustik**

der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Betreuer: Univ.-Ass. DI Alois Sontacchi

Begutachter: o.Univ.-Prof. Mag. DI Dr. Robert Höldrich

Graz, Oktober 2001

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen zur Raumakustik</b>	<b>5</b>
1.1	Wellentheoretische Raumakustik	5
1.2	Geometrische Raumakustik	6
1.3	Statistische Raumakustik	12
1.3.1	Die Nachhallzeit	12
1.3.2	Hallradius	14
1.4	Strahlverfolgung (Ray Tracing)	16
1.5	Die Schallteilchensimulation	16
<b>2</b>	<b>Kenngößen zur Beurteilung der Raumakustik und deren Wahrnehmung</b>	<b>18</b>
2.1	Begriffserklärungen	18
2.2	Messung	23
2.2.1	Gütemaße für Räumlichkeit	24
2.2.2	Stärke-Maß G	27
2.2.3	Baß Verhältnis (BR)	28
2.2.4	Gütemaße für Sprache	28
2.3	Wahrnehmung von Schallquellen in Hinblick auf akustische Beschreibungsformen	31
2.3.1	Prozesse, die auf einem niederen neuronalen Niveau stattfinden	31
2.3.2	Prozesse, die auf einem höheren Niveau stattfinden	32
2.3.3	Einfluss von seitlichen Reflexionen	34
<b>3</b>	<b>Raumakustik-Simulationsprogramm</b>	<b>39</b>
3.1	Struktur des Programms	39
3.2	Vereinfachte geometrische Annahmen	39
3.3	Überprüfung Spiegelquellen höherer Ordnung	40
3.3.1	Spiegelquellen 1.Ordnung	40
3.3.2	Spiegelquellen höherer Ordnung	42
3.4	Berechnung der Spiegelquellen	44
3.5	Berechnen eines frequenzabhängigen Reflexionsgrades	46
<b>4</b>	<b>Einführung zu elektroakustischen Systemen</b>	<b>54</b>
4.1	Natürlicher Hallradius und Hallradius eines RAK Systems	56
4.2	System mit einem Mikrofon	56
4.3	System mit mehreren Mikrofonen	57
4.4	Raumakustik Systeme – eine Auswahl	58
4.4.1	CMS	58
4.4.2	Mehrkanal Hall	58
4.4.3	ACS	59
4.4.4	RODS s	59
4.4.5	ARS	60

4.4.6	SIAP	60
4.4.7	CARMEN	61
4.4.8	LARES und VRAS	61
<b>5</b>	<b><i>Vergleich von LARES mit VRAS – Zwei Grundideen</i></b>	<b>62</b>
5.1	‘In line Systeme’	62
5.2	‘Non in line’ Systeme	62
5.3	<b>LARES - Verbesserung der RAK durch zeitvarianten künstlichen Hall</b>	<b>63</b>
5.3.1	Grundlage	63
5.3.2	Stabilität	64
5.3.3	Berechnung des erforderlichen Abstandes zur Quelle	65
5.3.4	Probleme, die sich aus der Zeitvarianz ergeben	66
5.3.5	LARES Beispiele	67
5.4	<b>VRAS - Variable Room Acoustics System</b>	<b>69</b>
5.4.1	Einleitung	69
5.4.2	Der elektroakustisch gekoppelte Raum	70
5.4.3	Kontrolle von frühen Reflexionen	71
5.4.4	Mittlere Verstärkungsanalyse eines allgemeinen ‘Enhancement’ Systems	71
5.4.5	Leistungsverstärkung mit Einbezug der Mikrofonrichtung und des Abstands zur Quelle	73
5.4.6	Abweichung von der mittleren Leistungsverstärkung	76
5.4.7	Realisierungsbeispiel	79
<b>6</b>	<b><i>Kompensation von frühen diskreten Raumreflexionen</i></b>	<b>80</b>
6.1	<b>Simulation mit dem RAK Programm</b>	<b>82</b>
6.2	<b>Bestimmen der Impulsantworten</b>	<b>84</b>
6.2.1	Ausmessen der Raumsamplepunkte (Positionieren der Sensoren)	84
6.2.2	Messung der Impulsantworten	85
6.2.3	Berechnung der Impulsantworten	86
6.3	<b>Filterberechnung</b>	<b>87</b>
6.3.1	Lösung im Frequenzbereich	88
6.3.2	Lösung im Zeitbereich	94
6.4	<b>Adaptive Lösung</b>	<b>97</b>
6.5	<b>Realisierung</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>103</b>
<b>Anhang</b>		<b>108</b>
<b>A</b>	<b>Grafische Oberfläche des Raumakustik - Simulationsprogramms</b>	<b>108</b>
<b>B</b>	<b>Raumsampling</b>	<b>110</b>
	Koordinaten der Raumpunkte	110
	Technische Daten des Messaufbaus	112

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die wesentlichen Grundlagen der Raumakustik besprochen und Parameter untersucht, die eine Beschreibung und Beurteilung einer Raumakustik ermöglichen. Außerdem werden bestehende elektroakustische Systeme vorgestellt, wobei die zwei grundlegenden Prinzipien - 'in-line' und 'non in-line' Systeme - gegenübergestellt werden. Zur Simulation unterschiedlicher Anforderungen, die sich im Rahmen der Diplomarbeit ergeben haben, wurde ein Raumakustiksimulationsprogramm entwickelt, das auf dem Prinzip der Spiegelquellenmethode basiert. Damit lassen sich sowohl Standardräume als auch, mit gewissen Einschränkungen, frei wählbare Raumgeometrien simulieren, wobei der konstruierte Raum auralisiert werden kann. Ausgehend von Simulationsversuchen zur Kompensation von frühen Raumreflexionen, die die Raumwahrnehmung maßgeblich beeinflussen, wird ein Ansatz erarbeitet, der den Einfluss des Raumes bei der Wiedergabe aufgenommener Signale durch eine inverse Filterung reduziert. Die Filterberechnung wird im Frequenz und Zeitbereich vorgestellt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt vor allem darin, dass das Verhältnis von Quell- zu Kompensationssignal separat eingestellt werden kann.

## Abstract

The essential basics of the room acoustics are discussed. Thereby parameters are investigated, which are used for the description and assesment of the room acoustic. Furthermore existing electroacoustical enhancement systems are introduced by comparing the two basic principles - in line and non in line systems. For the different demands, which occurred during the work, a room acoustic simulation program, based on the mirror principle, was developed. With this program standard rooms can be simulated as well as user defined room proportions (with some restrictions). An auralisation of the constructed room is possible, too. According to simulation tests to compensate the early room reflections, which play a decisive role in affecting the room perception, a new approach is discussed. This approach reduces the influence of the reproduction room by the use of inverse filters. The calculation of the filters is discussed in the frequency and time domain. The advantage of this approach is, that the relation of the source- and compensation signal can be regulated separately.

# 1 Grundlagen zur Raumakustik

---

Die Raumakustik lässt sich prinzipiell in 3 Teilbereiche gliedern: In die Wellentheoretische Raumakustik, die Geometrische Raumakustik und die Statistische Raumakustik.

## 1.1 Wellentheoretische Raumakustik

Grundlage der Wellentheoretischen Raumakustik sind die Wellengleichungen. Diese sind nur für einfache Raumformen lösbar. Sie kommt für tiefe Frequenzen zur Anwendung, d.h. wenn die Wellenlänge ungefähr in der Größenordnung der Raumabmessungen liegt. Aus der Wellengleichung für das Geschwindigkeitspotential wird der Schalldruck und die Schallschnelle berechnet.

$$\Delta \mathbf{f} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial t^2} \quad \mathbf{f} \dots \text{Geschwindigkeitspotential} \quad \text{Gl.1.1}$$

$$\mathbf{n} = -\text{grad} \mathbf{f} \quad \mathbf{n} \dots \text{Schallschnelle} \quad \text{Gl.1.2}$$

$$p = \frac{d\mathbf{f}}{dt} \quad p \dots \text{Schalldruck} \quad \text{Gl.1.3}$$

Werden schallharte Wände (Schallschnelle  $\mathbf{n} = 0$  normal zur Wand) und eine harmonische Anregung des Raumes angenommen, folgt:

$$\Delta \mathbf{f} = -\frac{\mathbf{w}^2}{c^2} \mathbf{f}(\mathbf{w}) = -k^2 \mathbf{f} \quad \text{Gl.1.4}$$

$$\text{mit } k = \frac{\mathbf{w}}{c} = \frac{2\pi f}{c} \dots \text{Wellenzahl}$$

Für einfache Raumformen ist diese Differentialgleichung geschlossen lösbar. Für einen Quader mit  $l_x > l_y > l_z$  löst folgender Ansatz die Wellengleichung für diskrete Frequenzen:

$$\mathbf{f} = \hat{\mathbf{f}} \cdot \cos\left(\frac{n_x \cdot \mathbf{P} \cdot x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \cdot \mathbf{P} \cdot y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \cdot \mathbf{P} \cdot z}{l_z}\right) \cdot e^{j\mathbf{w}t} \quad \text{Gl.1.5}$$

$n_x, n_y, n_z$  sind die Ordnungszahlen. Sie geben die Gitternetz – Knotenebenen des Schalldruckes an, die die Randbedingung erfüllen, dass die flächennormale Schnellekomponente an den Begrenzungsflächen verschwindet, also für alle identisch Null wird.

Die diskreten Frequenzen sind die Eigenschwingungen (Resonanzen) des Raumes.

$$f_R^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2 \left[ \left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2 \right] \quad \text{Gl.1.6}$$

Jedem Wertetripel entspricht eine Eigenschwingung des Raumes. Die Ordnungszahlen geben die Zahl der Knotenebenen des Schalldrucks an, die man beim Durchqueren des Raumes parallel zur entsprechenden Koordinatenachse passiert. Die Anzahl  $N$  der Eigenschwingungen bis zu einer Grenzfrequenz  $f_{GR}$  entspricht der Anzahl der Gitterpunkte im Frequenzraum mit kleinerer Frequenz als  $f_{GR}$ . Werden die Eigenfrequenzen der Kanten und Begrenzungsflächen berücksichtigt, folgt für  $N$

$$N = \frac{4f_{GR}^3 V}{3c^3} + \frac{f_{GR}^2 A}{4c^2} + \frac{f_{GR} L}{8c} \quad \text{Gl.1.7}$$

$f_{GR}$	Grenzfrequenz
$V$	Raumvolumen
$A$	gesamte Wandfläche
$L$	Summe der Kantenlängen

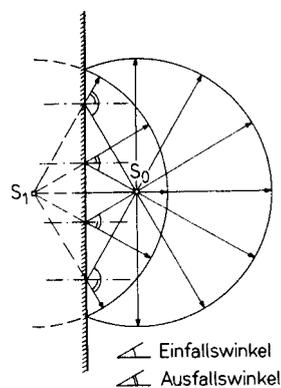
Für höhere Frequenzen werden die Eigenresonanzen immer dichter, die in diesem Fall als Eigenfrequenzen bezeichnet werden. Für sehr große Räume wird die Beschreibung des Schallfeldes durch Überlagerung vieler Eigenschwingungen zu kompliziert, man geht hier zur Statistischen Raumakustik über.

## 1.2 Geometrische Raumakustik

Dieser Teilbereich geht von einer strahlenförmigen Schallausbreitung aus. Dabei werden die Gesetze der Optik angewandt. Die Gesetze der Optik sind dann anwendbar, wenn es sich um große und glatte Reflexionsflächen handelt, d.h. ihre Gesamtabmessungen müssen groß, die Rauigkeiten müssen klein im Verhältnis zur Wellenlänge sein. Da mit jeder Reflexion das

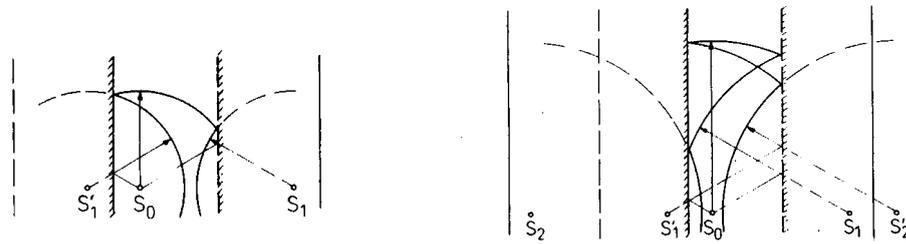
Beobachten der Schallstrahlen komplexer wird, beschränkt man sich auf die Zeit unmittelbar nach der Schallabstrahlung (Direktschall und erste Reflexionen). Das Modell des in Kapitel 3 besprochenen Simulationsprogramms stützt sich auf die geometrische Raumakustik, daher wird auf diese nun näher eingegangen.

Die Strahlverfolgung und die Positionsbestimmung der Spiegelquellen passiert in einfachster Weise auf dem Papier. Denkt man sich eine Schallquelle, die einen kurzen Impuls aussendet, und in einem bestimmten Abstand dazu eine Wand (=Spiegelfläche), so gehen zunächst die Schallstrahlen von der Schallquelle geradlinig ab. Die Wellenfront bildet dabei in der zweidimensionalen Darstellung einen Kreis (siehe Abb. 1.1), dessen Radius sich mit fortschreitender Zeit vergrößert. Trifft die Welle auf die Wand, so gilt: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel. Die rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen müssen sich also alle in einem Punkt schneiden, dessen Abstand von der Wand gleich dem des ursprünglichen Sendepunktes ist. Dieser Punkt wird als Spiegelquelle, genauer gesagt in diesem Fall als Spiegelquelle 1.Ordnung bezeichnet. Er wirkt nun als neue Schallquelle, sendet also Schallstrahlen ab, die gesamte Wellenfront besteht nun aus der Überlagerung von 2 Kreisbögen.



**Abb. 1.1: Spiegelquelle 1. Ordnung und Wellenfront [Cremer, Kap. 2]**

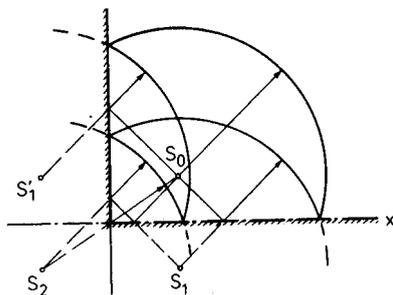
Nimmt man an, dass es noch eine 2. Spiegelwand gibt (z.B. 2 parallele Wände), so entstehen Spiegelquellen höherer Ordnung. Die Quelle erzeugt in diesem Fall 2 Spiegelquellen 1. Ordnung, eine an der linken Wand und eine an der rechten Wand.



**Abb. 1.2: Spiegelquellen 1. und 2. Ordnung für 2 parallele Wände [Cremer, Kap. 2]**

Die linke Spiegelquelle 1.Ordnung wird in weiterer Folge an der rechten Wand gespiegelt, die rechte Spiegelquelle 1. Ordnung an der linken Wand. Diese erzeugen also Spiegelquellen 2. Ordnung. Fährt man analog fort, so erhält man die Spiegelquellen dritter und höherer Ordnung. Es sind quasi unendlich viele solcher scheinbarer Sender möglich. Im praktischen Fall wird jedoch jeder Strahl bei der Reflexion durch den der Wand eigenen Absorptionsgrad gedämpft und nimmt daher in der Amplitude ab. Nach einer gewissen Anzahl an Reflexionen wird der Schallstrahl in seiner Amplitude so gedämpft sein, dass er nicht mehr von Bedeutung ist.

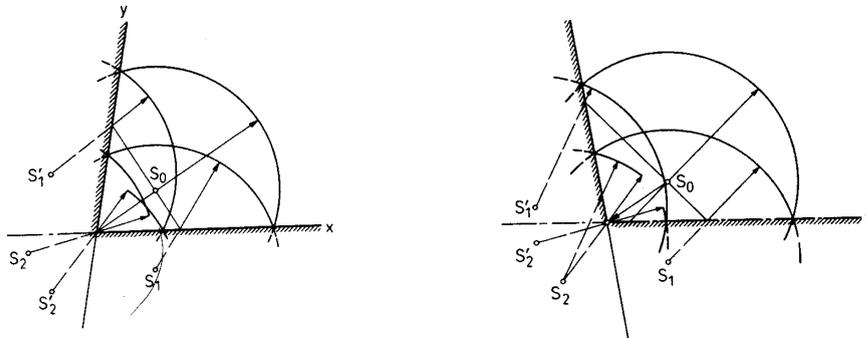
Einen Sonderfall bildet die rechte Ecke. Stehen zwei Wände in rechtem Winkel aufeinander, kommt es höchstens zu zwei Reflexionen (nur Spiegelquellen 2.Ordnung). Des weiteren verlässt jeder in die Ecke gerichtete Strahl dieselbe nach zweimaliger Reflexion entgegengesetzt seiner ursprünglichen Richtung.



**Abb. 1.3: Spiegelung an der rechten Ecke [Cremer, Kap. 2]**

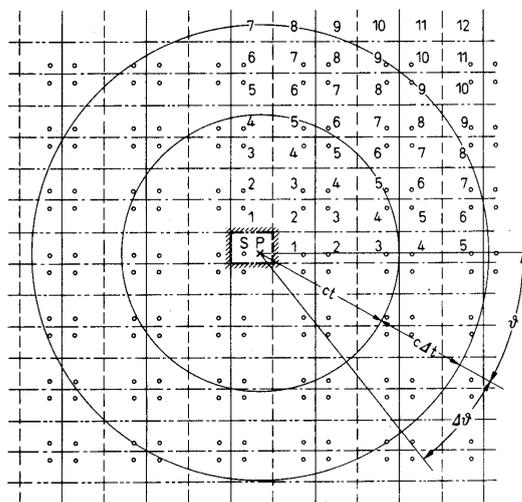
Im Fall, dass der Strahl in den Scheitel gerichtet ist, läuft er sich auf dem selben Weg entgegen und kehrt zum Sender zurück. Verändert man die Ecke zu einer „stumpfen“ bzw.

„spitzen“ Ecke, kann die Schallrückkehr zum Sendepunkt vermieden werden. Hier ergeben sich 2 Spiegelquellen 2. Ordnung, wie Abb. 1.4 zeigt. Ist der Winkel stumpf, so laufen die reflektierten Strahlen auseinander, ist er spitz, so kreuzen sie sich.



**Abb. 1.4: Spitze und stumpfe Ecke [Cremer, Kap. 2]**

Eine wertvolle Überprüfung zur Funktionsweise des Simulationsprogramms sind Räume, die eine gewisse Regelmäßigkeit in der Anordnung der Spiegelquellen erzeugen. So sind falsche Spiegelquellen rasch auf einen Blick zu erkennen<sup>1</sup>. Zu solchen Räumen zählen z.B. der Rechteckraum, der rechtwinklige gleichschenklige Dreiecksraum und der gleichseitige Dreiecksraum (siehe Abb. 1.7 u. 1.8).



**Abb. 1.5: Spiegelungen im Rechteck [Cremer, Kap. 2]**

<sup>1</sup> Zusätzlich werden zur Kontrolle an ausgesuchten Punkten Quellen positioniert und deren Spiegelquellen in einem Plan eingezeichnet. Die durch die Konstruktion gefundenen Koordinaten und Winkel werden anschließend mit den berechneten Koordinaten verglichen (siehe 3.3). Jede Spiegelquelle höherer Ordnung bedingt jedoch eine Maßstabsverkleinerung, um sie noch auf einem Blatt Papier erfassen zu können. Dabei stößt man bald an die Grenzen der Überprüfbarkeit.

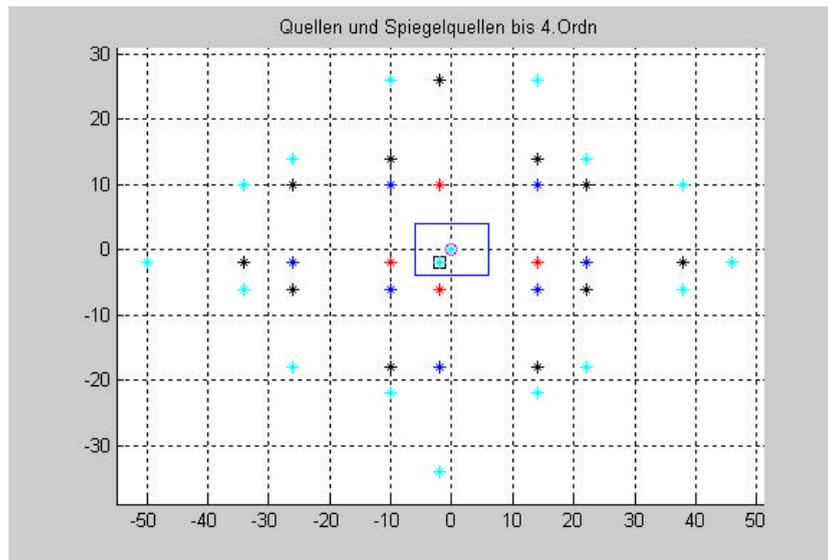


Abb. 1.6: Simulierte Spiegelquellen im Rechteckraum

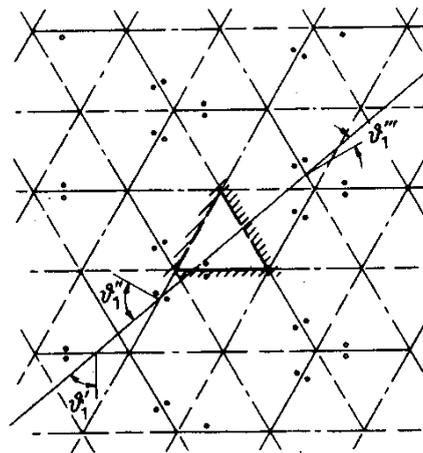


Abb. 1.7: Spiegelungen des gleichseitiges Dreiecks [Cremer, Kap. 2]<sup>1</sup>

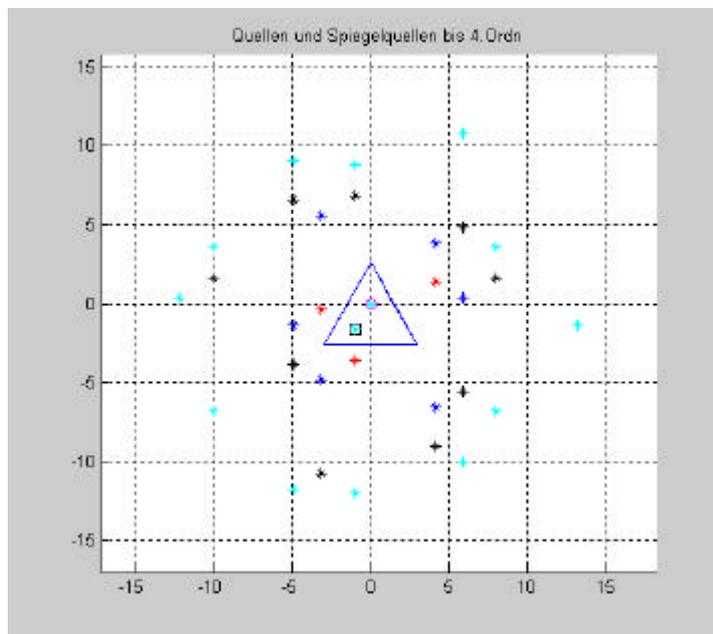
Sind beim Rechteckraum zwei gegenüberliegende Wände stark gedämpft, und die anderen hochgradig reflektierend, so entstehen „Flutter Echos“.<sup>2</sup> Abhilfe dagegen bietet ein Verdrehen der Längs und Querwände zu einem spitzen Winkel, wodurch ein trapezförmiger Grundriss entsteht, der im Prinzip auch dem Musikseminarraum IEM Cube<sup>3</sup> zu Grunde liegt. Bei

<sup>1</sup> Betrachtet man das gleichseitige Dreieck, so sieht man, dass es acht verschiedene Lagen einnehmen kann. Jeder Strahl gelangt daher durch die Reflexion an den Seitenwänden in sechs verschiedene Richtungen.

<sup>2</sup> Es bleiben nur die Strahlen übrig, die zu den gedämpften Wänden parallel sind. Dies äußert sich in impulsförmigen Schallrückwürfen in rascher Folge, die als störend empfunden werden.

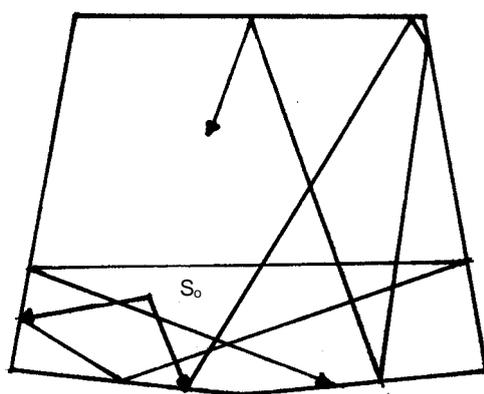
<sup>3</sup> IEM... Institut für Elektronische Musik.

beliebigen Winkeln zwischen den Wänden werden die Wandflächen immer unter neuen Winkeln getroffen, was anhand des Strahlenverlaufs in Abb. 1.9 gut ersichtlich ist.



**Abb. 1.8: Simulierte Spiegelquellen im gleichseitigen Dreieck**

Rot...Spiegelquellen 1. Ordnung,      blau...Spiegelquellen 2. Ordnung,  
schwarz...Spiegelquellen 3. Ordnung,      cyan...Spiegelquellen 4. Ordnung.



**Abb. 1.9: Strahlenverlauf im Musikseminarraum für 2 unterschiedliche Schallstrahlen**

### 1.3 Statistische Raumakustik

Bei dem Modell der geometrischen Raumakustik steigt mit fortschreitendem Beobachtungszeitraum die Komplexität, da sich die Anzahl der Spiegelquellen drastisch erhöht.<sup>1</sup> Die in allen Schallstrahlen steckende Gesamtenergie wird sich im Idealfall in alle Raumgebiete und Richtungen gleichmäßig verteilen. Über das Schallfeld können keine exakten Aussagen gemacht werden. Das Schallfeld wird diffus, d.h. die Energiedichte ist im Raum gleichverteilt. Hier geht man zur statistischen Raumakustik über. Diese beschäftigt sich vor allem mit dem Zeitverlauf von Schallfeldparametern in Räumen, wobei die geometrische Form des Raumes außer Acht gelassen wird. Zwei wesentliche Größen sind u.a. die Nachhallzeit  $T_N$  und der Hallradius  $r_H$ , auf die hier näher eingegangen wird.

#### 1.3.1 Die Nachhallzeit

Betrachtet man ein Wellenpaket mit der Anfangsenergie  $\Delta W$ , das sich im Raum ausbreitet, so wird die Energie nach jeder Reflexion abnehmen. Nach einer Reflexion beträgt sie  $\Delta W(1-a)$ . Die Anzahl der Reflexionen eines Wellenpaketes wird als mittlere Stoßzahl  $n$  bezeichnet.

$$n = \frac{A \cdot c}{4V} \quad [1/s] \quad \text{Gl.1.8}$$

$\Delta W$	Energie am Anfang	
$\Delta W(1-a)$	Energie nach einer Reflexion	
$\Delta W = (1-a)^n = (1-a)^{\frac{A \cdot c \cdot t}{4V}}$	Energie nach nt Reflexionen	Gl.1.9

$A$       Fläche  
 $V$       Volumen  
 $c$       Schallgeschwindigkeit

---

<sup>1</sup> Vergleicht man dies mit der wellentheoretischen Raumakustik, so werden hier mit steigendem Beobachtungszeitraum die Eigenfrequenzen immer dichter, wodurch ihre Aussagekraft sinkt.

Wird die zur Zeit  $t = 0$  vorhandene Energiedichte mit  $E_0$  bezeichnet, so fällt die Schallenergiedichte mit der Zeit  $t$  nach folgender Gesetzmäßigkeit ab.<sup>1</sup>

$$E(t) = E_0 \cdot (1 - \mathbf{a})^{\frac{A \cdot c \cdot t}{4V}} = E_0 e^{\frac{A \cdot c \cdot \ln(1 - \mathbf{a}) \cdot t}{4V}} \quad \text{Gl.1.10}$$

Die Nachhallzeit ist nun als jene Zeit definiert, innerhalb der die Energie auf den millionsten bzw. der Schalldruck auf den tausendsten Teil abklingt. Dies entspricht einer Abnahme um 60 dB .

$$\frac{E}{E_0} = 10^{-6} = e^{\frac{A \cdot c \cdot \ln(1 - \mathbf{a}) \cdot t}{4V}} \quad \text{Gl.1.11}$$

$$\ln(10^{-6}) \cdot 4V = A \cdot c \cdot \ln(1 - \mathbf{a}) \cdot t \quad \text{Gl.1.12}$$

$$t = T_N = \frac{\ln(10^{-6}) \cdot 4V}{A \cdot c \cdot \ln(1 - \mathbf{a})} = 13.82 \cdot \frac{4V}{-A \cdot c \cdot \ln(1 - \mathbf{a})} \quad \text{Gl.1.13}$$

Setzt man für die Schallgeschwindigkeit  $c = 344 \text{ m/s}$  ein, so erhält man die

Nachhallzeit nach Eyring

$$T_N = 0.161 \cdot \left[ \frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \frac{V}{-A \cdot \ln(1 - \mathbf{a})} \quad \text{Gl.1.14}$$

Für kleine bzw. mittlere Schallabsorptionsgrade kann  $\ln(1 - \mathbf{a})$  durch  $-\mathbf{a}$  angenähert werden.

Dies führt zur

Nachhallzeit nach Sabine

$$T_N = 0.161 \cdot \frac{V}{\mathbf{a}A} \quad \text{Gl.1.15}$$

Die Nachhallzeit ist einer der ältesten und wichtigsten Parameter bei der akustischen Beurteilung von Räumen.

---

<sup>1</sup>  $(1 - \mathbf{a})^x = e^{x \cdot \ln(1 - \mathbf{a})}$

### Messung der Nachhallzeit

Die Messung der Nachhallzeit kann durch Anregung des Raumes mit schmalbandigen Signalen oder kurzen, breitbandigen Impulsen und anschließende Auswertung des Abklingvorgangs erfolgen. Ebenso kann breitbandiges rosa Rauschen verwendet werden. Aus dem aufgezeichneten Schallpegel nimmt man meist einen  $-30\text{dB}$  Abfall (von  $-5$  bis  $-35$  dB) und verdoppelt die gemessene Zeit.

Ist die Impulsantwort bekannt, so kann man durch Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort (Schröder- Rückwärtsintegration) die Nachhallzeit bestimmen.

$$r^2(t) = \text{const} \cdot \int_t^{\infty} h(\mathbf{t})^2 dt \quad \text{Gl.1.16}$$

Diese Methode ist frei von statistischen Nebeneffekten, liefert allerdings keine frequenzselektive Aussage über die Nachhallzeit, die beim Design elektroakustischer Systeme von Bedeutung sein kann. Zur frequenzselektiven Messung wird in jedem Oktav- oder Terzband durch Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort die Abklingkurve bestimmt und ausgewertet.

#### 1.3.2 Hallradius

In einem Raum kann das Schallfeld durch das Direktschallfeld und das Diffusschallfeld beschrieben werden. Das Direktschallfeld kann man näherungsweise durch die Kugelwellenausbreitung beschreiben, d.h. die Energie sinkt mit dem Quadrat des Abstandes zur Schallquelle.

$$E_{Dir} = \frac{P}{4\mathbf{p} \cdot r^2 \cdot c} \quad \text{Gl.1.17}$$

Die Diffusschallenergie (=stationäre Energiedichte) bildet sich, wenn nach Anklingen des Schalls im Raum die von der Schallquelle abgestrahlte Energie gleich der von den Wänden absorbierten Energie ist. Sie sinkt also mit steigendem Absorptionsgrad. Im Grenzfall des schallarmen Raumes gibt es praktisch keine Diffusschallenergie.

$$E_{Diff} = \frac{4P}{4 \cdot c \cdot \mathbf{a}} \quad \text{Gl.1.18}$$

Der Hallradius ist nun jener Abstand, bei dem die Direktschallenergie und die Diffusschallenergie gleich groß sind (siehe Abb. 1.10).

$$E_{Dir} \stackrel{!}{=} E_{Diff} \quad \frac{4P}{4 \cdot c \cdot a} = \frac{P}{4p \cdot r^2 \cdot c} \rightarrow r_H = \sqrt{\frac{aA}{16p}} \quad \text{Gl.1.19}$$

Der Hallradius nimmt mit dem Raumvolumen zu und verringert sich mit zunehmender Nachhallzeit  $T_N$ .

$$r_H = 0.057 \sqrt{\frac{V}{T_N}} \quad \text{Gl.1.20}$$

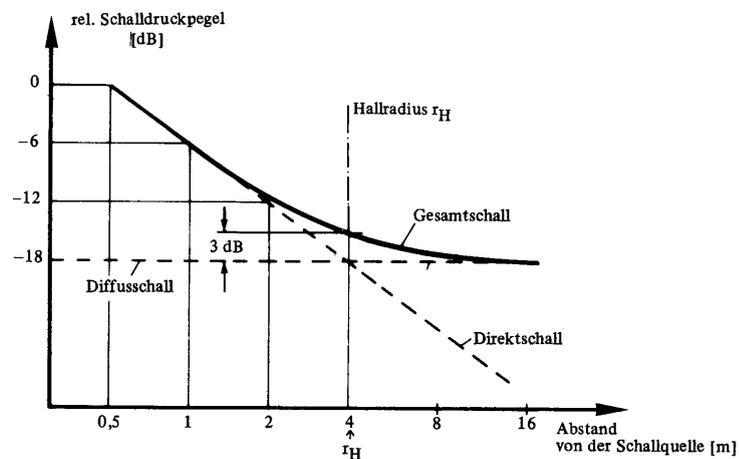


Abb. 1.10: Die Überlagerung von Direkt- und Diffusschall, Hallradius  $r_H$ , vgl. [Dickreiter]

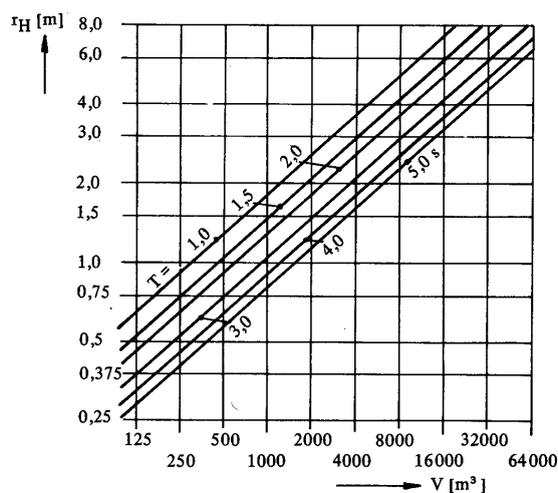


Abb. 1.11: Hallradius  $r_H$  abhängig vom Raumvolumen  $V$  und der Nachhallzeit  $T_N$ , vgl. [Dickreiter]

### 1.4 Strahlverfolgung (Ray Tracing)

Bei der Strahlverfolgung gehen von jeder Schallquelle Schallstrahlen aus, von denen jeder einen Ausschnitt einer Kugelwelle repräsentiert, wobei sich mit laufender Zeit sein Querschnitt vergrößert. Der Zuhörerbereich ist in einzelne Detektorfelder unterteilt. Wird ein solches Feld von einem Kegel gestreift, bekommt es eine Energie zugeordnet, die der Laufzeit des Strahls entspricht. Dabei werden Auftreffzeit und Einfallrichtung registriert.

Pyramid Tracing ist eine Sonderform des Ray Tracing. Damit lassen sich besonders Räume mit ungünstigen Raumproportionen und inhomogenen Absorptionskoeffizienten simulieren. Die Rechenzeit ist dabei erheblich kürzer als beim herkömmlichen Ray Tracing Algorithmus.<sup>1</sup>

### 1.5 Die Schallteilchensimulation

Die Schallteilchensimulation, ist eine numerische, statistische Methode zur Berechnung von Schallfeldern in großen Räumen. Bei der Schallteilchenmethode wird die Ausbreitung von Schallwellen durch eine Vielzahl sich mit Schallgeschwindigkeit bewegender, punktförmiger Teilchen simuliert. Von einem Quellpunkt aus werden einige 10000 Schallteilchen (Energiequanten) in möglichst gleichförmig verteilte Raumrichtungen ausgesandt, wobei Ihre Pfade im Raum über mehrere Reflexionen verfolgt werden (siehe Abb. 1.10). Mit jeder Reflexion wird die Energie gemäss dem Absorptionskoeffizienten reduziert. Bei der Durchquerung von Detektoren, z.B. kleine quaderförmigen Volumina, werden die Schallteilchenenergien aufsummiert. Diese Volumina dienen zur Trefferdetektion und sind repräsentativ für Zuhörer oder Immissionspunkte. Daraus werden die orts- und zeitabhängigen Energiedichten bestimmt und schließlich raumakustische Parameter berechnet. Ihre Verteilung kann grafisch, z.B. als "Landkarte" dargestellt werden (siehe Abb.1.11). So sind Defizite oder durch Umbaumaßnahmen erreichte Verbesserungen rasch erkennbar.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Ein Beispiel für den Pyramid Tracing Algorithmus ist ein Programm namens Ramsete, das an der Universität in Parma [Farina] entwickelt wurde.

<sup>2</sup> Für die Schallteilchensimulation ist beispielhaft das Programm SOPRAN (Sound particle Programme for Room Acoustics and Noise Immission) zu nennen, das am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) für die raumakustische Planung von Auditorien und Arbeitsräumen konzipiert wurde.

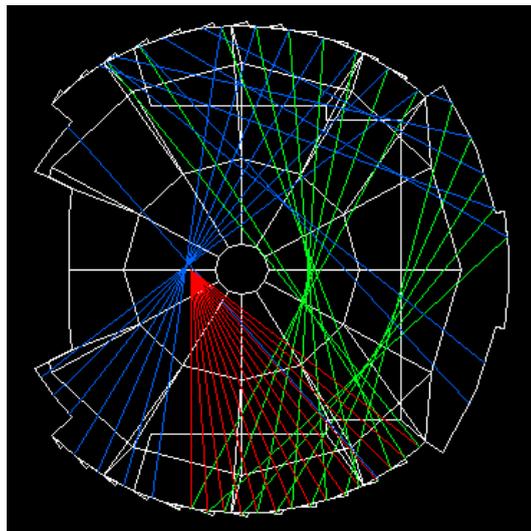


Abb. 1.12: Strahlverfolgung bei der Schallteilchensimulation, [homegape IBP]

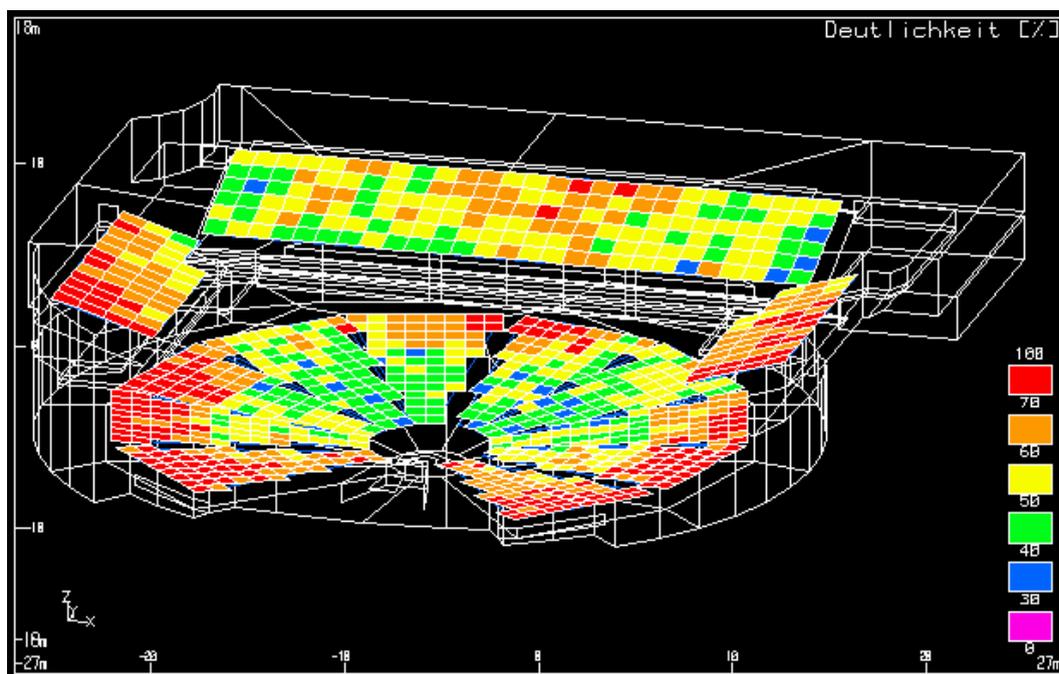


Abb. 1.13: Simulation der Deutlichkeitsverteilung im Plenarsaal des deutschen Bundestages, [homegape IBP]

## 2 Kenngößen zur Beurteilung der Raumakustik und deren Wahrnehmung

---

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Termini angesprochen, mit Hilfe derer eine Einschätzung einer Sprach- bzw. Musikwiedergabe erfolgt. Dabei kann es sein, dass ein und derselbe Begriff je nach Literatur eine unterschiedliche Bedeutung hat. Die Begriffserklärungen stützen sich dabei auf [Beranek], wobei sie aus aktueller Literatur mit Ergänzungen versehen sind. Einige dieser Kenngößen sind neben den akustischen Faktoren auch von musikalischen abhängig, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. In Anschluss an die Begriffsbestimmungen wird die Messung (falls möglich) beschrieben.

### 2.1 Begriffserklärungen

Nachhall, Nachhallzeit

Engl.: Reverberation oder liveness

Nachklingen eines Schalls nach Beendigung der Schallanregung. Die Nachhallzeit ist die Dauer der Wahrnehmbarkeit des Nachhalls. Sie kann einerseits durch eine Vergrößerung des Raumvolumens, andererseits durch Reduktion der gesamten Raumabsorption erhöht werden. 'Liveness' ist in erster Linie mit den Nachhallzeiten bei mittleren und hohen Frequenzen verknüpft, etwa ab 350 Hz.

Running Reverberation

Für Musik mit wenigen langen Pausen ist nicht der gesamte Hallabfall hörbar. Hier wird der Halleindruck von dem ersten hörbaren Teil des Abfalls bestimmt. Dies wird 'running reverberation' genannt.

## Raumeindruck

Mit der Entwicklung von dreidimensionalen Audio Systemen hat die Beschreibung der Qualität des entstehenden Raumeindrucks an Bedeutung gewonnen. Dabei haben sich zwei zentrale Begriffe gebildet: Die Einfallweite (ASW) und die Einhüllung (LEV).

### Einfallweite

Engl.: Spaciousness: apparent source width (ASW)

Früher wurde 'spacious' mit ASW gleichgesetzt. In [Griesinger, 3] bezieht Griesinger ASW jedoch nur auf die Schallquellenverbreiterung, und nicht auf 'spaciousness'. 'Spaciousness' ist für ihn gleichbedeutend mit 'envelopment' (Einhüllung). Räumlichkeit entsteht, wenn der Zuhörer den Eindruck hat, dass die gespielte Musik aus einer größeren räumlichen Breite als der visuelle Eindruck kommt.

### Einhüllung

Engl.: Spaciousness: listener envelopment (LEV)

LEV wird dann am höchsten bewertet, wenn der Nachhall am Zuhörerohr gleichmäßig aus allen Richtungen zu kommen scheint.

In [Ahnert, Steffen] findet sich folgende Definition: „Empfindung des Zusammenwirkens von Schallquellen mit ihrer räumlichen Umgebung einschließlich der Einbeziehung des Hörers darin.“ Sie bildet sich aus folgenden Parametern: Raumgrößeneindruck, Räumlichkeit, Halligkeit und Gleichverteilung des Raumschalls. Räumlichkeit entspricht hier ASW.

### Klarheit

Engl.: Clarity

Bezeichnet das Ausmaß, zu welchem die einzelnen akustischen Bestandteile einer musikalischen Darbietung diskret wahrgenommen werden. Die Klarheit hängt dabei sowohl von den raumakustischen Qualitäten des Saales, als auch von den musikalischen Faktoren und dem Können der Musiker ab.

### Intimität

Engl.: Intimacy oder presence

Eine Halle wird als akustisch intim bezeichnet, wenn die darin gespielte Musik den Eindruck erweckt, dass die Halle klein sei. In der Sprache der Tontechniker wird dies „Präsenz“ genannt.

### Wärme

Engl.: Warmth

Wärme wird in der Musik durch die Lebendigkeit des Basses bzw. die Fülle der Basstöne (zw. 75 und 350 Hz) in Relation zu den mittleren Frequenzen (350-1400Hz) definiert. Sind die Bässe zu dominant oder die hohen Frequenzen zu stark gedämpft, wird ein Saal von Musikern gerne als „dunkel“ (‘dark’) bezeichnet.<sup>1</sup>

### Lautstärke

Engl.: Loudness

Dieser Parameter wird durch die Leistung der Schallquelle ( $W$ ), die Distanz zum Zuhörer ( $r$ ) und den Raumabsorptionsgrad bestimmt.<sup>2</sup> Der Raumabsorptionsgrad ist dabei erheblich größer, wenn der Saal besetzt ist.

### Flimmern

Engl.: Acoustic glare

Frühen Reflexionen mit einer harten Klangqualität können entsprechend dem optischen Flimmern ein akustisches Flimmern erzeugen. Verhindert wird akustisches Flimmern durch kleinformartige Unregelmäßigkeiten auf den Oberflächen oder geeignete Krümmungen (vgl. akustisches Barock).

---

<sup>1</sup> Ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen ist in Räumen für Musikdarbietungen erwünscht, da dies die geringere Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen ausgleicht.

<sup>2</sup> Vgl. Intensität Kap. 5.4.4

### Brillanz

Engl.: Brilliance

Ein klarer und heller Klang wird als brillant bezeichnet. Bei einem brillanten Klang sind die höheren Frequenzen dominant und klingen langsam ab. Das heißt, dass die hohen Frequenzen praktisch nur durch die Luftabsorption geschwächt werden.

### Balance

Engl.: Balance

Die akustische Balance ist unausgewogen, wenn das Bühnenhaus oder andere Oberflächen in der Nähe der Musiker bestimmte Bereiche hervorhebt oder die Solisten nicht ausreichend unterstützt. Im Opernhaus ergibt sich die Balance zwischen Sängern und dem Orchester durch das Bühnendesign, bühennahe Reflektorflächen für frühe Reflexionen und die Form des Orchestergrabens.

### Abstimmung

Engl.: Blend

Die Abstimmung ist definiert als die Mischung der Klänge der einzelnen Instrumente zu einem harmonischen Ganzen. Die Abstimmung hängt neben der Aufstellung des Orchesters sehr stark von schallreflektierenden Flächen in der Nähe der Bühne und vom Bühnenhaus ab.

### Zusammenspiel

Engl.: Ensemble

Das Zusammenspiel eines Orchesters hängt auch davon ab, ob die einzelnen Musiker das Spiel ihrer Kollegen hören können. Schallreflektierende Oberflächen sollen den Schall von einer Seite der Bühne zu der anderen Seite befördern. Ist kein ausgewogenes Zusammenspiel gegeben, so leidet darunter auch die Balance.

### Unverzögliche Antwort

Engl.: Immediacy of response (attack)

Vom Standpunkt der Musiker aus soll die Halle den Musikern das Gefühl geben, dass die Halle unmittelbar auf einen Ton reagiert. Die 'Immediacy of response' hängt mit der Art und Weise zusammen, in der die ersten Reflexionen aus der Halle die Ohren der Musiker erreichen. Falls die Reflexionen zu spät kommen, werden sie als störende Echos empfunden, falls sie nur aus dem unmittelbar umgebenden Bühnenbereich gehört werden, wird der Musiker die Akustik der Halle nicht wahrnehmen können.

### Textur

Engl.: Texture

Textur ist der subjektive Eindruck, den ein Zuhörer aus dem Muster, in dem die Sequenzen der frühen Reflexionen sein Ohr erreichen, ableitet. In einer ausgezeichneten Halle folgen die frühen Reflexionen dem Direktschall in einer mehr oder weniger uniformen Abfolge. Gute Textur erfordert eine große Anzahl an frühen Reflexionen, gleichförmig, aber nicht exakt voneinander getrennt, und vor allem ohne einzelne Reflexionen, die die anderen dominieren (eine sehr starke Reflexion verdeckt kurz darauffolgende schwächere Reflexionen).

### Echofreiheit

Engl.: Freedom from echo<sup>1</sup>

Sehr hohe oder fokussierende Deckenflächen können Echos hervorrufen. Sie können auch aus langen, hohen und gekrümmten Rückwandflächen kommen, deren Brennpunkt auf oder nahe der Bühne liegt. Die Neigung zu störender Echobildung ist in Sälen mit kurzen Nachhallzeiten größer als in solchen mit langen Nachhallzeiten.

### Störeffekte auf die Klangqualität

Engl.: 'Extraneous effects on tonal quality'

---

<sup>1</sup> Starke Reflexionen, die ca. 50ms nach dem Direktschall eintreffen werden als Echo bezeichnet

Die Klangqualität kann durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden, z.B. durch Rasseln in einer metallischen Oberfläche, durch das Mitschwingen von Lüftungs-Rohrleitungen bei gewissen Frequenzen etc.. Kleinformatige Unebenheiten auf glatten Oberflächen können diese Effekte vermindern.

Ein anderer Störeffekt ist jener der Schallquellenverschiebung ('shift of source'). Eine spezielle schallreflektierende Fläche fokussiert einen beträchtlichen Schallanteil auf einen bestimmten Teil der Zuhörer. Dort scheint der Schall aus dieser Fläche zu kommen und nicht aus dem Orchester.

### Gleichmäßigkeit

Engl.: Uniformity of sound

Angestrebt wird eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle. Die Qualität leidet, wenn Teile der Halle einer minderwertigen Akustik ausgesetzt sind, z.B. unter einem tiefen überhängenden Balkon oder wenn in bestimmten Bereichen Reflexionen Echos produzieren, oder die musikalische Information nur verschwommen mit einem Mangel an Klarheit gehört wird. Ziel eines elektroakustischen Systems kann es nun z.B. sein, eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle zu erzeugen.

## 2.2 Messung

Studien<sup>1</sup> ab den 60er Jahren haben schließlich zu den Gütemaßen geführt, die nun in richtiger Kombination in hohem Maße ein subjektives Empfinden einer akustischen Raumqualität beschreiben können.

Die Gütemaße werden aus den Energiebetrachtungen hergeleitet. Dazu wird die Raumimpulsantwort gemessen und ihre Energie zu verschiedenen Zeiten betrachtet. Je nach Gütemaß ergeben sich andere Integrationsgrenzen. Ein Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit bei der Beurteilung von Räumen für musikalische Darbietungen, weshalb die Gütemaße für Sprache nur überblicksmäßig dargestellt werden und auf die Abbildung von Diagrammen, die zu deren Ermittlung erforderlich sind, verzichtet wird.

---

<sup>1</sup> Vgl. [Barron, Marshall], [Ando], [Yamamoto, Zuzuki], [Kimura], [Gade], [Vian, Pelorsen], [Beranek] und [Griesinger 2-4 u. 6]

### 2.2.1 Gütemaße für Räumlichkeit

IACF, IACCA, IACCE und IACCL

Die Interaurale Kreuzkorrelations-Funktion (IACF) ist ein binaurales Maß für die unterschiedlichen Schalldrücke an den Ohren (L...linkes Ohr, R...rechtes Ohr), die durch eine Quelle auf der Bühne hervorgerufen werden. Der maximal mögliche Wert ist 1.  $t$  nimmt Werte zwischen  $-1$  und  $1$  ms ein.

$$IACF_t(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \mathbf{t}) dt}{\left( \int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

$p(t)$ ...Schalldruck

Wird der Maximalwert genommen, erhält man den Kreuzkorrelationskoeffizienten.

$$IACC_t = \max |IACF(\mathbf{t})| \quad \text{für } -1 < \mathbf{t} < 1$$

Unterschiedliche Integrationsgrenzen legen dabei fest, ob es sich um ein Maß für ASW oder LEV handelt.

$IACC_A$ :	von $t_1 = 0$ bis $t_2 = 1000ms$	
$IACC_{E(arly)}$ :	von $t_1 = 0$ bis $t_2 = 80ms$	ASW
$IACC_{L(ate)}$ :	von $t_1 = 80$ bis $t_2 = 1000ms$	LEV

### Seitenschallgrad (LF)

Der Seitenschallgrad (Lateral fraction – LF) beschreibt die Stärke der seitlichen Reflexionen. Die seitlichen Reflexionen werden mit einem Mikrofon mit Achtercharakteristik gemessen und ins Verhältnis zum Ausgang eines Kugelmikrofons gesetzt. Bildet man vom Seiteschallgrad den Logarithmus zur Basis 10, so erhält man das Seitenschallmaß. Oft wird der Seitenschallgrad mit Räumlichkeit in Verbindung gebracht.

$$LF = \frac{\int_0^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (\text{siehe}^1) \quad \text{Gl. 2.2}$$

Griesinger widmet sich in [Griesinger, 3] sehr ausführlich der Messung von 'envelopment' (= 'spaciousness')<sup>2</sup>. Er stimmt darin überein, dass IACC<sub>E</sub> und LF ein Maß für ASW sind. Allerdings könnten sie keine Aussage über LEV treffen. Gerade dieses LEV ist für ihn von entscheidender Bedeutung zur Beschreibung von „Räumlichkeit“. Eine gute Möglichkeit zur Messung von 'envelopment' sei der von Bradley und Souloudre (vgl. [Bradley, Souloudre ]) vorgeschlagene Seitliche Hallgrad (lateral hall gain), allerdings mit veränderten Integrationsgrenzen (160ms statt 80ms).

Lateral Hall Gain (LG)

$$LG = \frac{\int_0^{\infty} v_{\text{seitlich}10m}(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{gesamtdirekt}10m}(t)^2 dt} \quad \text{bzw.} \quad LG = \frac{\int_0^{\infty} v_{\text{seitlich}10m}(t)^2 dt}{\int_0^{160ms} p_{\text{gesamtdirekt}10m}(t)^2 dt} \quad \text{Gl. 2.3}$$

**n** ... Schallschnelle

Der Gesamtschalldruck wird hier in einem reflexionsarmen Raum mit einem Kugelmikrofon in Abstand von 10m zur Schallquelle gemessen, die Schallschnelle mit einem Achtermikrofon.

Inter Aural Difference (IAD)

Ist der Unterschied in dB zwischen dem Quadrat eines gefilterten Differenzsignals eines Kunstkopfes und der Summe der Quadrate der zwei unterschiedlichen Ohrsignale des

---

<sup>1</sup> Die untere Integrationsgrenze von 5ms wird gewählt, um den Direktschallanteil mit Sicherheit ausschließen zu können.

<sup>2</sup> Griesinger unterscheidet dabei 3 unterschiedliche Arten von envelopment: Continuous Spatial Impression (CSI), Early Spatial Impression (ESI) (das eigentlich nicht einhüllend ist) und Background Spatial Impression (BSI). Auf diese wird in 2.3.3 eingegangen.

Kunstkopfes. Die Filterung soll das Absinken der Signaldifferenz in einem Diffusfeld unter 300 Hz ausgleichen.

IAD wird dabei in Oktavbändern berechnet. Das Ergebnis gibt als Funktion der Zeit und Frequenz an, aus welcher Richtung die in einem Raum reflektierte Energie kommt.

$$IAD(t) = 10 \log \left( \frac{(eq(L(t) - R(t)))^2}{L(t)^2 + R(t)^2} \right) \quad \text{Gl. 2.4}$$

### Anfangsnachhallzeit (EDT)

Die EDT ('Early Decay Time') ist eine genauere Charakterisierung der Nachhallzeit. Da der Anfangsteil des Abklingvorganges im allgemeinen besser wahrgenommen wird als der gesamte 60 dB Abfall der Nachhallzeit, dominiert er auch den subjektiv empfundenen Nachhall. Die Anfangsnachhallzeit wird nun bestimmt, indem man einen Abfall von 0 auf -10dB misst und diesen anschließend auf -60dB extrapoliert (unterschiedliche Raummoden, die die entsprechende Steigung des Abfalls bewirken werden vernachlässigt).

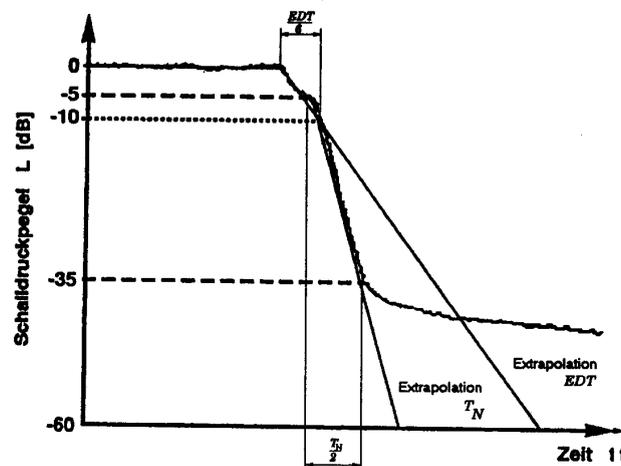


Abb. 1.11.: Nachhallzeit  $T_N$  und Anfangsnachhallzeit EDT, vgl. [Fasold, Seite 141]

Um aus der Anfangsnachhallzeit auch räumliche Eigenschaften ableiten zu können, schlägt Griesinger in [Griesinger, 3] eine neue Meßmethode vor, und zwar die seitliche Frühe Abfallzeit (LEDT).

### Lateral Early Decay Time (LEDT)

Gemessen wird die LEDT, indem man eine Linie vom Peak der Rückwärtsintegration des Schalldrucks zum Punkt der Rückwärtsintegration der IAD bei 350ms zieht. Der Abfall dieser Linie entspricht der LEDT.

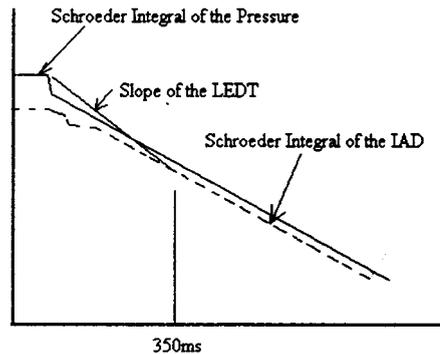


Abb. 1.12: LEDT, vgl. [Griesinger, 3]

### Running Reverberation (RR160)

$$RR160 = \frac{\int_0^{320ms} p^2(t) dt}{\int_0^{160ms} p^2(t) dt} \quad \text{Gl. 2.5}$$

Ist ein Maß für die Stärke des Halles, den Musiker hören während sie spielen (Vgl. 2.1.2).

### 2.2.2 Stärke-Maß G

Dient zur Bewertung der Lautstärke und gibt die Energiedichte an, die bei einer gegebenen Sendeleistung einer Schallquelle vorhanden ist. Der Nenner bezeichnet die Bezugsschalleistung, die bei freier Schallausbreitung in 10 m Abstand von der Quelle ermittelt wird. G liegt idealerweise zwischen 0 und 10 dB.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{t_2} p^2(x) dt}{\int_0^{t_2} p^2(rs) dt} \quad \text{Gl. 2.6}$$

### 2.2.3 Baß Verhältnis (BR)

$$BR = \frac{T_{N125Hz} + T_{N250Hz}}{T_{N500Hz} + T_{N1000Hz}} \quad \text{Gl. 2.7}$$

$T_N$  bezeichnet die Nachhallzeiten bei den angegebenen Frequenzen.

### 2.2.4 Gütemaße für Sprache

#### Silbenverständlichkeit

In Räumen, die für Sprachdarbietungen verwendet werden, ist eine hohe Sprachverständlichkeit erwünscht. Ein Maß dafür ist die Silbenverständlichkeit, bei der auch eine subjektive Beurteilung der Verständlichkeit durch Testpersonen erfolgen kann. Dazu werden Logatome<sup>1</sup> vor den Testpersonen deutlich vorgesprochen. Das Verhältnis der richtig verstandenen Logatome zu den verlesenen entspricht der Silbenverständlichkeit. Gute Werte liegen zwischen 90 und 96%.

$$v = 96 \cdot k_F \cdot k_N \cdot k_C \quad [\%] \quad \text{Silbenverständlichkeit} \quad \text{Gl. 2.8}$$

$k_F$	Silbenverständlichkeitsfaktor <sup>2</sup>	$k_F = k_{ft} \cdot k_{fh} \leq 1$
$k_N$	Lautstärkefaktor ( $k_N \sim 0.9$ ) <sup>3</sup>	$k_N \leq 1$
$k_C$	Verständlichkeitsfaktor	$k_C \leq 1$

$k_F$  und  $k_N$  werden aus Diagrammen entnommen,  $k_C$  berechnet sich aus dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ .

$$k_C = \sqrt[5]{\frac{1}{1 + 10^{\frac{C_{50}}{10dB}}}}$$

---

<sup>1</sup> Dies sind einsilbige Wörter, die einzeln und im Zusammenhang keinen logischen Sinn geben, eine logische Ergänzung durch die Testperson also unmöglich ist.

<sup>2</sup> Der Silbenverständlichkeitsfaktor  $k_F$  berücksichtigt eine Bandbreiteneinschränkung, wie sie z.B. durch eine Beschallungsanlage erfolgen kann. Den Faktor  $k_{ft}$  erhält man aus der unteren Grenzfrequenz,  $k_{fh}$  aus der oberen Grenzfrequenz.

<sup>3</sup> Der Faktor  $k_N$  berücksichtigt den Signal-Stör Abstand am Hörerort.

Klarheitsmaß  $C_{80}$ , Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$

Das Klarheitsmaß beschreibt die Durchsichtigkeit zeitlich aufeinander folgender Töne bei Musik. Es gibt das Verhältnis der eintreffenden Energie bis 80ms zur Energie, die nach 80ms kommt, an. Sein Pendant für die Sprache ist das Deutlichkeitsmaß.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \qquad C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \qquad \text{Gl. 2.9}$$

Für  $C_{50}$  größer als 2dB ist die Verständlichkeit sehr gut.

Artikulationsverlust bei Sprache,  $Al_{cons}$

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten ist für die Sprachverständlichkeit in Räumen maßgebend (vgl. [Peutz] u. [Klein]). Daraus wurde ein Kriterium zur Bestimmung der Verständlichkeit entwickelt. Voraussetzung für folgende Formel ist, dass der Signal-Stör-Abstand S/N größer als 35dB ist.

$$Al_{cons} \approx 0.652 \cdot \left( \frac{r_{LH}}{r_R} \right)^2 T_N \quad [\%] \qquad \text{Gl. 2.10}$$

$T_N$	Nachhallzeit
$r_{LH}$	Abstand zwischen Schallquelle und Hörer
$r_R \approx \sqrt{g} \cdot r_H$	Richtungsentfernung (= effektiver Hallradius) <sup>1</sup>
$g$	Bündelungsgrad der Schallquelle
$r_H$	Hallradius

Der Artikulationsverlust nimmt mit der Nachhallzeit und dem wachsendem Abstand zwischen Schallquelle und Hörer zu. Elektroakustisch lässt sich die Verständlichkeit durch Einsatz

---

<sup>1</sup> Musikinstrumente, „Mund“ und Lautsprecher zeigen mit zunehmender Frequenz eine Richtwirkung, die den sogenannten „effektiven Hallradius“ frequenzabhängig vergrößert.

gerichteter Strahler verbessern. Ist  $Al_{\text{cons}} < 2\%$ , so ist ideale Verständlichkeit gegeben, ist  $Al_{\text{cons}} > 20\%$ , so ist die Verständlichkeit unbrauchbar.

### Sprachübertragungsindex RASTI

Die Grundidee ist hier, dass nicht nur Nachhall und Störgeräusche, sondern auch alle fremden Signalveränderungen, die auf dem Weg zwischen Quelle und Hörer auftreten, die Sprachverständlichkeit herabsetzen.<sup>1</sup> Eine Verschlechterung der Sprachverständlichkeit kann als Abnahme der Modulationsübertragungsfunktion MTF angesehen werden. Beim RASTI Verfahren werden vereinfacht für 9 Modulationsfrequenzen in 2 ausgesuchten Oktavbändern (500 Hz und 2kHz) die Modulationsreduktionsfaktoren  $m(F)$  berechnet.

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2pF \cdot T / 13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-(S/N)/10\text{dB}}} \quad \text{Gl. 2.11}$$

$F$	Modulationsfrequenz in Hz
$T_N$	Nachhallzeit in s
$S/N$	Signal-Stör-Verhältnis in dB

Mit diesen Werten können die scheinbaren S/N Abstände  $X_i$  berechnet werden, die für den RASTI Wert benötigt werden.

$$X_i = 10 \log \left( \frac{m_i}{1 - m_i} \right) \text{dB} \quad \text{Gl. 2.12a}$$

Der RASTI Wert errechnet sich nun aus der arithmetischen Mittelung der scheinbaren Signal Störabstände in einem Frequenzband.

$$\bar{X} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 X_i \quad \text{Gl. 2.12b}$$

---

<sup>1</sup> siehe [Ahnert, Steffen]

$$RASTI = \frac{\bar{X} + 15}{30} \quad \text{Gl. 2.13}$$

Ein RASTI Maß größer als 80% ist Zeichen einer ausgezeichneten Verständlichkeit.

### 2.3 Wahrnehmung von Schallquellen in Hinblick auf akustische Beschreibungsformen

D. Griesinger hat sich in [Griesinger, 6] sehr ausführlich der Wahrnehmung von LEV und ASW gewidmet, deren Verständnis für die Konzeption eines elektroakustischen Systems von Bedeutung ist. In [Griesinger, 5] hat er manche seiner Ansichten revidiert und erweitert. Er spricht von sogenannten Schlüsselprozessen in der menschlichen Wahrnehmung, von denen jeder auf einer höheren neuronalen Stufe arbeitet. Diese Prozesse sind jene, die auf einem niederen Niveau stattfinden ('low level processes') und jene, die auf einem höheren Niveau stattfinden ('higher level processes').

#### 2.3.1 Prozesse, die auf einem niederen neuronalen Niveau stattfinden

Diese Prozesse stehen am Beginn des Wahrnehmungsprozesses und haben allgemein kurze Zeitkonstanten. Zu ihnen zählen

1. Die Analyse von einfallendem Schalldruck in Frequenzbändern. Diese Analyse erfolgt auf der Basilarmembran und ist grundlegend für den Hörprozess.
2. Die Detektion von schnellen Pegelanstiegen in Frequenzbändern. Diese Detektion der steigenden Flanke ist der erste Schritt, um den Beginn individueller „Vordergrundschallflüsse“ zu finden.
3. Detektion von interauralen Zeit- und Pegelunterschieden<sup>1</sup> in jedem Frequenzband.

---

<sup>1</sup> IID...Interaural Intensity Differences, ITD...Interaural Time Differences

Diese werden zusammen mit der steigenden Flanke durchgeschaltet, um den Azimuth<sup>1</sup> der Schallquelle zu bestimmen. Gibt es keine steigende Flanke, so wie es bei kontinuierlichem Schall der Fall ist, so bestimmen IID und ITD trotzdem den Azimuth, falls sie stabil und konsistent sind.

#### 4. Bestimmen der durchschnittlichen Unsicherheit in IID und ITD.

In einer akustischen Umgebung werden diese Unsicherheiten hauptsächlich durch Schwankungen sowohl in IID als auch in ITD gebildet. Die Schwankungen entstehen durch Interferenz des Direktschalls mit dem reflektierten Schall. Treten Schwankungen der IID und ITD während der steigenden Flanke eines Schallereignisses auf, wird die Schallquelle verbreitert. Später auftretende Schwankungen können als Einhüllung (LEV) bezeichnet werden, was hauptsächlich davon abhängt, wann diese Schwankungen relativ zum Schallereignis stattfinden.

Das Grundlegendste dieser 'low level' Prozesse ist die Analyse des Schalls in Frequenzbändern. In all den höheren Prozessen wird davon ausgegangen, dass diese Analyse bereits stattgefunden hat. Daher folgt, dass Wahrnehmungen wie Verständlichkeit, Lokalisation und Einhüllung (LEV) frequenzabhängig sind. Enthält ein spezielles Schallereignis beispielsweise sowohl hohe als auch tiefe Frequenzen, so kann die Schärfe der Lokalisation in den verschiedenen Frequenzbändern getrennt wahrgenommen werden. Das am genauesten lokalisierte Frequenzband wird allerdings den Gesamteindruck dominieren. Die gleiche Frequenzselektivität gilt natürlich auch für LEV.

#### 2.3.2 Prozesse, die auf einem höheren Niveau stattfinden (Aufgelistet in der Reihenfolge, in der sie stattfinden)

1. Analyse von Schall in individuelle Einheiten, den Phonemen (für Sprache) und den Tönen (für Musik). Für diese Analyse muss der Hörprozeß herausfinden, wo das eine Schallereignis endet und das andere beginnt. Dabei ist die Detektion des Endes meist gleich wichtig wie die Detektion des Beginns.

---

<sup>1</sup> Azimuth oder Lateralisation bezeichnet die Auslenkung aus der Medianebene um einen bestimmten Winkel.

2. Bestimmen der Richtung und der Klangfarbe eines einzelnen Hörereignisses.
3. Das Zusammenfassen von Gruppen von Hörereignissen in sogenannte Vordergrunddatenflüsse ('foreground streams')
4. Sprechen mehrere Personen gleichzeitig, werden die Klangeinheiten von jedem einzelnen in einem separaten Fluss zusammengefasst. Ebenso können mehrere verschiedene Vordergrunddatenflüsse gleichzeitig vorhanden sein. Der Prozess, der den Fluss gestaltet, sortiert individuelle Schallereignisse, indem er alle verfügbaren Hinweise, wie z.B. Richtung und Klangfarbe verwertet. Daher kann der Azimuth eines speziellen Ereignisses helfen, es einem Fluss zuzuordnen.
5. Das Bilden eines Hintergrunddatenflusses ('background stream'), der Schallereignisse enthält, die zwischen Elementen des 'Vordergrunddatenflusses' stattfinden. Dieser Hintergrundfluss enthält z.B. Hintergrundgeräusche und den Hallanteil. Wichtig ist, dass immer nur ein Hintergrundfluss existieren kann.
6. Zuordnen einer Bedeutung zu den Vordergrunddatenflüssen.
7. Die relative Stärke der Vordergrund- und Hintergrundflüsse erlaubt einen Rückschluss auf die Quelldistanz.
8. Die Interpretation von Schwankungen in IID und ITD entweder als reinen „Raumeindruck“<sup>d</sup> oder als LEV.

Bei den höher angesiedelten Prozessen ist die Analyse von Schall in einzelne Schallereignisse weitaus am kritischsten. Verständnis von Sprache sinkt z.B. sehr schnell, wenn Rauschen oder akustische Störungen eine zuverlässige Detektion des Endes oder des Beginnes von Phonemen verhindert (vgl. Messung der Verständlichkeit über die Modulationsübertragungsfunktion).

---

<sup>1</sup> Raumeindruck beschreibt hier das Gefühl, dass man sich in einem geschlossenen Raum befindet. Unter Räumlichkeit im Sinne von 'spaciousness' versteht Griesinger das Gefühl in einem großen einhüllenden Raum zu sein.

Aus dem Ereignis- Detektions- Prozess kann man ableiten:

1. Der Einfluss von frühen Reflexionen hängt von der Anstiegszeit eines Schallereignisses ab.
2. Haben Schallereignisse schnelle Attacken, wird die Schärfe des Schallabbildes (ASW) durch das Vorhandensein oder die Abwesenheit von reflektierter Energie bestimmt, die innerhalb der Anstiegszeit eines Schallereignisses das Ohr des Zuhörers erreicht.
3. Legatomusik<sup>1</sup> für eine große Streichergruppe neigt dazu, lange Anstiegszeiten für einzelne Töne zu haben. Man erwartet, dass das Schallabbild durch seitliche Reflexionen, die nach 50ms eintreffen verbreitert wird.
4. Verständlichkeit von Sprache oder Musik wird verringert, falls die reflektierte Energie die Detektion von Start und Endpunkten von Phonemen oder Tönen reduziert.
5. Die Wahrnehmung des Nachhalls und des LEV hängt vom Vorhandensein von Lücken zwischen den Tönen ab. Somit ist sie abhängig von
  - Der Transparenz des musikalischen Materials
  - Von der Stärke des Hallanteils wenigstens 100ms nach dem Ende der Note

### 2.3.3 Einfluss von seitlichen Reflexionen

Für Sprache, Solo-Musik und dünn instrumentierte Orchestermusik haben seitliche Reflexionen je nach ihrem zeitlichen Eintreffen unterschiedliche Eigenschaften, die in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind.

Die zeitlichen Reflexionen, die nach 150ms eintreffen sind gut wahrnehmbar. Sie produzieren die größte „Selbstunterstützung“ für einen Solomusiker und erzeugen LEV für einen Zuhörer im Saal. Die Stärke des wahrgenommenen LEV hängt stark von der absoluten Lautstärke und dem Nachhall ab. Je lauter ein Musiker spielt, desto stärker wird ‘envelopment’ sein. Griesinger nennt diese Art von ‘envelopment’ ‘Background spatial impression’ (BSI).

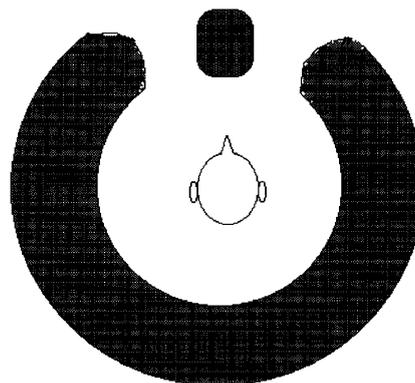
---

<sup>1</sup> Unter legato versteht man das Verbinden von Tönen. Für Blasinstrumente bedeutet das, dass der Atemstrom nicht unterbrochen wird, für Streichinstrumente, dass mehrere Töne auf einen Bogenstrich kommen (und dabei nicht abgesetzt werden).

Zeitliches Eintreffen der Reflexionen	Mögliche Eigenschaft
0-10ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Klang wird lauter</li> <li>• Die Klangfarbe ändert sich</li> <li>• Das Schallquellenabbild verbreitert sich und/oder</li> <li>• Das Abbild verschiebt sich</li> </ul>
10-50ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Raumeindruck entsteht, der nicht einhüllend, aber erwünscht ist, falls die Reflexionen nicht die Energie des Direktschalls überschreiten. Reflektierte Energie, die in diesem Zeitraum kommt, kann die Lautheit erhöhen, und die Klangfarbe des Schallereignisses verändern. Der räumliche Eindruck der entsteht, wird ESI genannt (siehe Abb. 2.3)</li> </ul>
50-150ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptsächlich sinkt die Verständlichkeit</li> </ul>
150-400ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diese Reflexionen bilden den Hintergrundfluss.</li> </ul>

**Tabelle 2.1: Zeitliches Eintreffen von Reflexionen bei Sprache, Solomusik und dünn instrumentierter Orchestermusik und ihre Auswirkung auf die Wahrnehmung, nach [Griesinger, 5]**

Background spatial impression: BSI. Raumeindruck, der in dünn orchestrierter Orchestermusik und in Solo Musik, die marcato oder détaché gespielt wird, entsteht.<sup>1</sup> Die Stärke des Eindrucks hängt von der reflektierten Energie und nicht vom Verhältnis der direkten zu reflektierten Energie ab.



**Abb. 2.1: BSI, vgl. [Griesinger, 4]**

<sup>1</sup> Von marcato spricht man, wenn Töne markiert und besonders herausgehoben werden. Détaché ist eine Strichart, die im ständigen Wechsel von Ab- und Aufstrich besteht (abgesetzt), wobei jede Note einen eigenen Bogenstrich erhält.

Continuous spatial impression: CSI. Hier fühlt sich der Zuhörer von einem „Klang“ umgeben, der nicht als separater Eindruck wahrgenommen werden kann. BSI und CSI sind oft schwer zu unterscheiden.

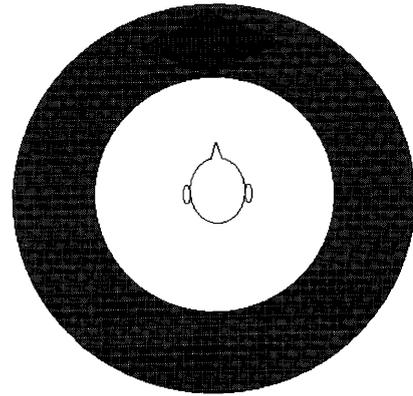


Abb. 2.2: CSI, vgl. [Griesinger, 4]

Early spatial impression: ESI. Entsteht bei Quellen, die kurze, von Pausen durchsetzte Schallereignisse erzeugen. Der Raumeindruck der dabei entsteht, kommt von vorne. ESI ist dabei nicht einhüllend.

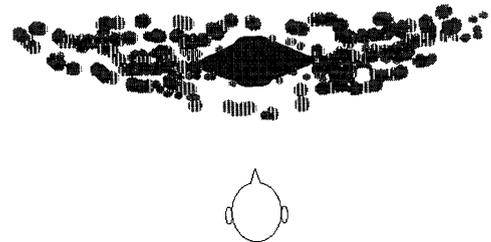


Abb. 2.3: ESI, vgl. [Griesinger, 4]

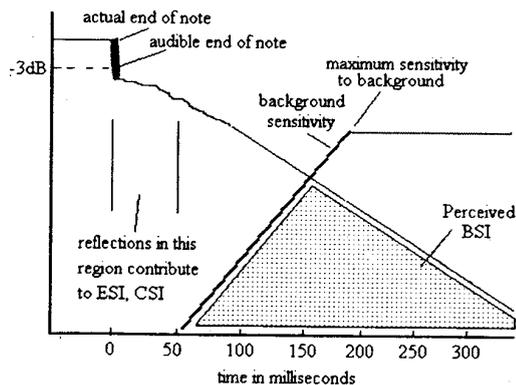


Abb. 2.4, Wahrnehmung von BSI bei niedrigen frühen Reflexionen und geringem Hallpegel, vgl. [Griesinger, 6]

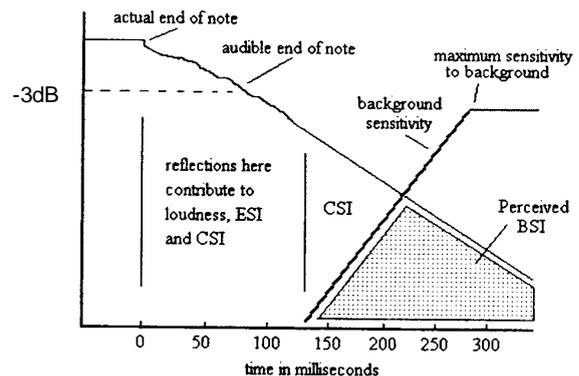


Abb. 2.5 Wahrnehmung von BSI bei frühen Reflexionen, die das Ende des Tones maskieren und höherem Hallpegel, vgl. [Griesinger, 6]

Die wahrgenommene Stärke von BSI ist das Produkt aus der Hintergrundempfindlichkeit und dem Hallanteil. In Abb. 2.4 sind die frühen Reflexionen und der Hallanteil gering, das Ende des Tons kann deutlich wahrgenommen werden. Betrachtet man hingegen Abb. 2.5, so wird das Ende des Tons durch frühe Reflexionen und den höheren Hallpegel maskiert. Der wahrgenommene Hintergrundfluss und BSI sind geringer.

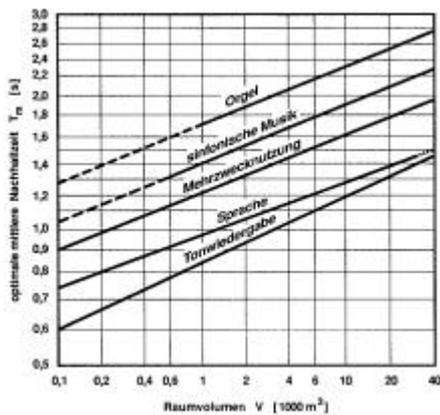
Für Streicher, die legato spielen, und durchgehend dicht instrumentierte Musik sind die Anfänge von Tönen nicht leicht erkennbar. Daher ist der Einfluss von seitlichen Reflexionen von der zeitlichen Verzögerung geringer abhängig.

Zeitliches Eintreffen der Reflexionen	Mögliche Eigenschaft
0-10ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Klangfarbe und die Lautheit wird verändert.</li> </ul>
10-50ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klangfarbe und Lautheit wird verändert</li> <li>• Das Schallquellenabbild wird verbreitert.</li> <li>• Diese Reflexionen tragen zu CSI bei</li> </ul>
50-150ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswirkungen auf die musikalische Verständlichkeit</li> <li>• Verbreiterung des Schallquellenabbildes</li> <li>• Beitrag zu CSI</li> </ul>
150-400ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beitrag zu CSI</li> <li>• Mit sehr stark verbundenen Schallquellen kann die Schallquellenweite verändert werden.</li> </ul>

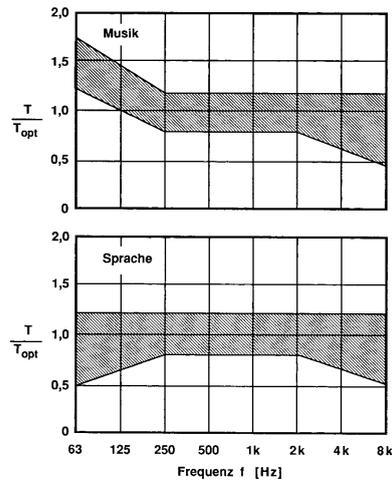
**Tabelle 2.2: Zeitliches Eintreffen von Reflexionen bei legato Musik und dicht instrumentierter Orchestermusik und ihre Auswirkung auf die Wahrnehmung, nach [Griesinger, 5]**

Für kontinuierliche Musik wirken sich also beinahe alle seitlichen Reflexionen auf LEV aus. Dabei ist es das Verhältnis zwischen der gesamten mittleren und der gesamten seitlichen Energie, das den Betrag von LEV bestimmt. Dies ist besonders bei tiefen Frequenzen richtig. Konzertsäle und Opernhäuser müssen meist mehreren Anwendungen entsprechen. Einerseits ist für Sprache eine gute Verständlichkeit gefordert (d.h. reflektierte Energie die 50ms oder später nach dem Direktschall kommt, muss minimiert werden), andererseits muss für

Konzerte die Nachhallzeit lang genug sein (siehe Abb.2.6 u. Abb. 2.7). Allerdings besteht ein grundlegender Unterschied, ob ein kleiner oder ein großer Saal eine lange Nachhallzeit aufweist. Beide klingen mit gleicher Nachhallzeit komplett unterschiedlich. Nachhallzeit, Hallpegel und der Abstand zu einer Schallquelle hängen stark von einander ab. Das Ändern eines Parameters bewirkt auch eine Änderung der anderen Parameter. Hat ein kleiner Saal eine Nachhallzeit von 2 Sekunden, wird der Hallpegel für die meisten Anwendungen zu groß sein. Der Hallradius ist zu klein.



**Abb. 2.6:** Optimale mittlere Nachhallzeiten  $T_{Nm}$  bei 500 Hz bis 1000 Hz für verschiedene Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen, vgl. [Fasold, Seite 139]



**Abb. 2.7:** Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit bezogen auf den Optimalwert der mittleren Nachhallzeit  $T_{opt}$  nach Abb. 2.6 vgl. [Fasold, Seite 139]

### 3 Raumakustik-Simulationsprogramm

#### 3.1 Struktur des Programms

Das Programm sollte eine hohe Flexibilität aufweisen. Diese wurde durch einen modularen Aufbau erreicht. Nach dem Modell der geometrischen Raumakustik wurde ein vereinfachter Grundriss und Aufriss des Musikseminarraums erstellt. Mit Hilfe des Spiegelquellenmodells werden Reflexionen bis zur 4. Ordnung berücksichtigt, wobei die Ausbreitung entweder vertikal oder horizontal erfolgt. Bei jeder Reflexion kann dabei je nach Wandseite ein unterschiedlicher frequenzabhängiger Reflexionsgrad berücksichtigt werden. Von allen Spiegelquellen werden nun die Zeitpunkte und Amplituden aller Reflexionen berechnet. Durch deren richtiges Zusammenfügen ergibt sich schließlich die Impulsantwort, die Grundlage weiterer Simulationen ist.

#### 3.2 Vereinfachte geometrische Annahmen

Wie in Kapitel 1.2 bereits gezeigt wurde, ist die Positionsbestimmung von Spiegelquellen in quadratischen Räumen am einfachsten.

Der Grundriss des Musikseminarraums ist jedoch ein Trapez, dessen Grundseite leicht gekrümmt ist. Diese Krümmung wurde im vorliegenden Simulationsprogramm durch zwei Linien angenähert, wodurch die Fokussierung dieser Wand in vereinfachter Form erhalten bleibt. Dies ist ein guter Kompromiss zwischen einer Annäherung durch eine Gerade (die erheblich einfacher zu realisieren gewesen wäre) und einer zu hohen Komplexität.

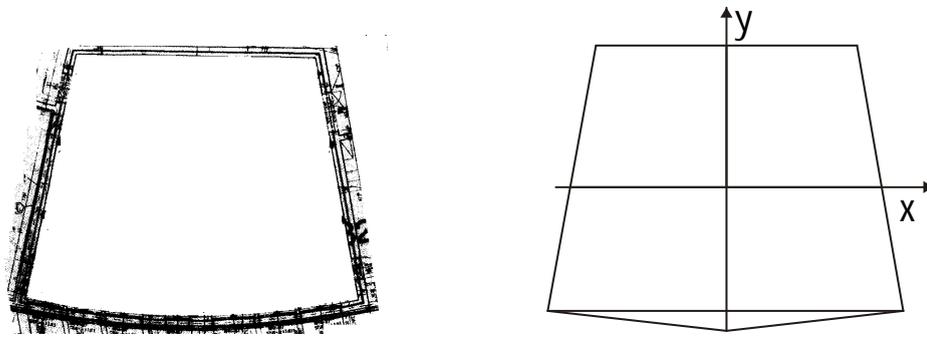
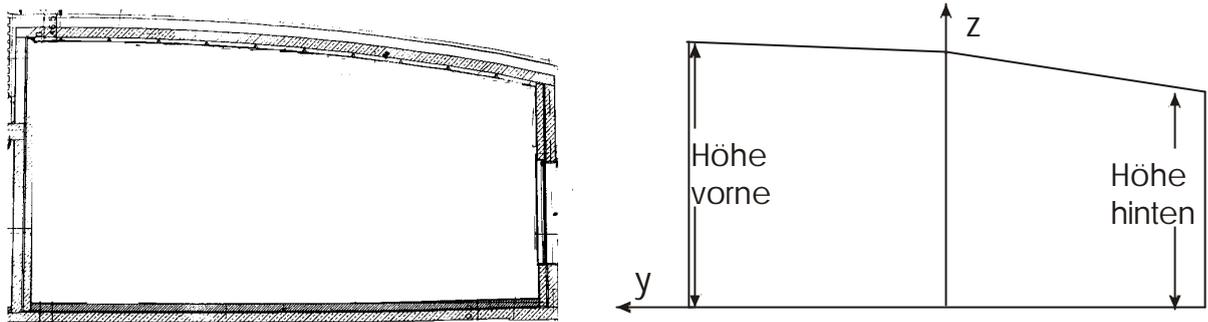


Abb. 3.1: Grundriss des Musikseminarraums und dessen Vereinfachung

Die leicht gekrümmte Decke des Musikseminarraums wurde durch zwei Geraden mit unterschiedlicher Steigung ersetzt (siehe Abb. 3.1). Grundriss und Aufriss ergeben ein dreidimensionales Spiegelquellenmodell. Allerdings muss an dieser Stelle bemerkt werden, dass nur Spiegelquellen entweder in horizontaler oder vertikaler Richtung berücksichtigt werden, jedoch keine Kombination der beiden erfolgt.



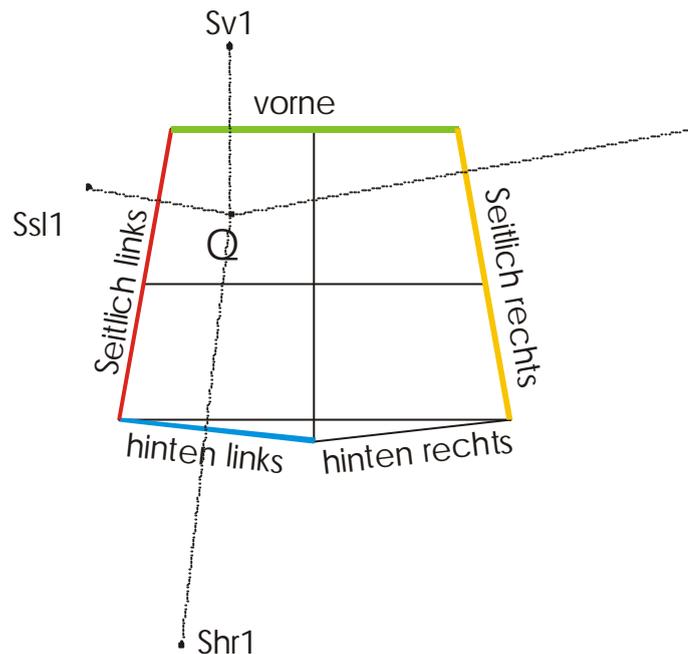
**Abb. 3.2: Aufriss des Musikseminarraums und dessen Vereinfachung**

### 3.3 Überprüfung Spiegelquellen höherer Ordnung

Liegen kompliziertere Raumformen als der einfache Rechteckraum vor, so ist ein entscheidender Punkt bei der Berechnung der Spiegelquellen höherer Ordnung die Überprüfung, ob überhaupt eine Spiegelung höherer Ordnung möglich ist.

#### 3.3.1 Spiegelquellen 1.Ordnung

Die Position der Spiegelquelle 1.Ordnung wird bestimmt, indem senkrecht zur Spiegelwand in gleichem Abstand die Spiegelquelle eingezeichnet wird. Lässt sich also eine Senkrechte Linie zwischen Spiegelwand und Quelle einzeichnen, so ist eine Reflexion 1. Ordnung möglich. Liegt die Quelle aber so, dass sich keine Senkrechte zwischen Quelle und Spiegelquelle konstruieren lässt, so ist keine Spiegelung 1. Ordnung möglich. Dies ist in Abb. 3.3 ersichtlich. In diesem Beispiel kann die Quelle an allen Wandflächen bis auf die hintere rechte Wand gespiegelt werden (die hintere Wand ist in eine hintere linke und hintere rechte Wand unterteilt).



**Abb. 3.3 Spiegelquellen 1.Ordnung**

Im Falle der vorderen Wand (siehe Abb. 3.5) ist eine mathematische Überprüfung schnell möglich. Ist der Betrag der x-Koordinate der Quelle größer als die halbe vordere seitliche Wandlänge (bei einer Raumgeometrie, die bezüglich des Ursprungs symmetrisch ist), so gibt es an dieser Wand keine Reflexion 1. Ordnung.

Etwas komplizierter verhält es sich mit der Überprüfung einer Spiegelung an den hinteren und seitlichen Wänden. Dies kann durch Aufstellen der Geradengleichung ( $y = k \cdot x + d$ ) für die Senkrechte der Spiegelwand gelöst werden. Dies sei anhand der linken hinteren Wand gezeigt (siehe Abb. 3.4).

z.B. Spiegelquelle  $S = [-1, 2]$ ;  $\alpha = 6.22^\circ$   $|m| = 5$

Berechnen der Steigung:  $k_{hl} = \tan(90^\circ - \alpha) = 9.18$

$$d = -m = -5$$

Ist die x-Koordinate nun kleiner als x aus der Geradengleichung, so ist eine linke hintere Spiegelung möglich.

$$x = \frac{y - d}{k}$$

$$S_x < \frac{S_y - d}{k} \quad ? \quad -1 < \frac{2+5}{9.18} \quad \text{w. A.} \rightarrow \text{Spiegelung möglich}$$

Wie Abb. 3.4 zeigt, ist eine linke hintere Spiegelung nur für Quellen möglich, deren Koordinaten nicht im roten Bereich liegen. Auf gleiche Weise lassen sich die Spiegelungen an den Seitenwänden überprüfen.

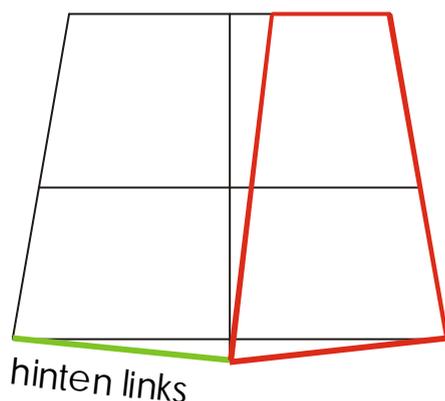


Abb. 3.4: Keine Spiegelung hinten links

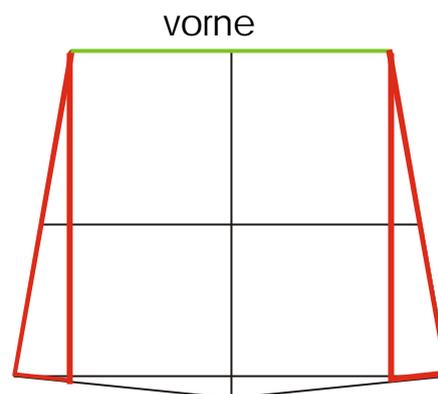


Abb. 3.5: Keine vordere Spiegelung

### 3.3.2 Spiegelquellen höherer Ordnung

Der Algorithmus zur Überprüfung von Spiegelquellen höherer Ordnung sieht folgendermaßen aus: Jede Spiegelquelle liegt erstens außerhalb des Grundrisses und zweitens hinter der Wand, an der gerade eine Spiegelung stattgefunden hat (diese habe die Eckpunkte A und B –siehe Abb. 3.6). Zieht man nun jeweils eine Gerade durch die Spiegelquelle und den Punkt A bzw. den Punkt B, ergibt sich ein Strahlkegel. Dieser zeigt, wo Schallstrahlen auftreffen können und somit Ausgangspunkt weiterer Reflexionen sind. Mathematisch erfolgt die Kontrolle durch Vergleichen unterschiedlicher Winkel, die die Spiegelquelle mit den Wandflächen bildet. Ist beispielsweise der Winkel zwischen Spiegelquelle und Punkt A und Punkt B größer als der Winkel zwischen Spiegelquelle und Punkt B und Punkt C, so ist die Wand CD Ausgangspunkt einer weiteren Spiegelquelle. In Abb. 3.6 wird überprüft, welche weiteren Spiegelquellen eine seitliche linke Spiegelquelle 2.Ordnung erzeugen kann. In diesem Fall gibt 3 Spiegelquellen 3.Ordnung. Die eine Spiegelung findet an der rechten seitlichen Wandfläche statt, die anderen Spiegelungen an der rechten und linken hinteren Wandfläche. Für die genaue mathematische

Ausformulierung und eventuelle auftretende Ausnahmen sei an die Programmcodes verwiesen siehe [Dokumentation]. Der oben beschriebene Algorithmus ist für alle Spiegelquellen höherer Ordnung anwendbar

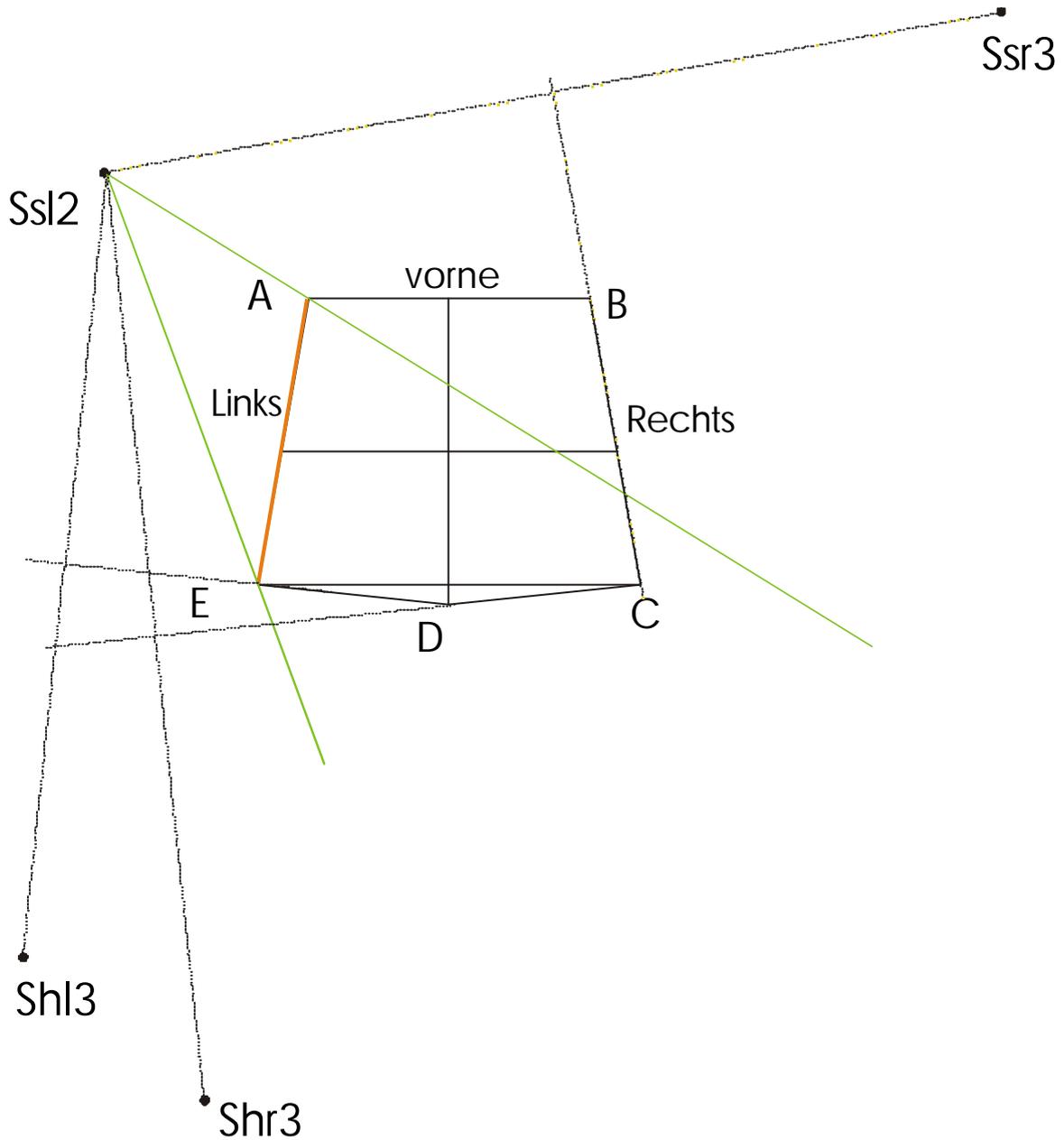


Abb. 3.6: Überprüfung Spiegelquellen höherer Ordnung

### 3.4 Berechnung der Spiegelquellen

Soll die Spiegelquelle an einer zu den Koordinatenachsen parallelen Wand (vgl. vordere Wand) berechnet werden, so wird einfach der Abstand Quelle-Wand zum Abstand Ursprung-Wand addiert und ergibt die Koordinate der Spiegelquelle.

Ist die Spiegelwand geneigt, kann eine Lösung mit Hilfe der Kongruenzabbildungen gefunden werden. Die Koordinaten der Quelle bzw. Spiegelquelle werden bezüglich eines ausgesuchten Drehpunktes transformiert. Nun wird eine Drehung um diesen neuen Nullpunkt durchgeführt. Dies erfolgt mit Hilfe der Rotationsmatrix  $C$ .

$$C = \begin{pmatrix} \cos(\mathbf{j}) & -\sin(\mathbf{j}) \\ \sin(\mathbf{j}) & \cos(\mathbf{j}) \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$x' = C \cdot x$$

$$x_1' = x_1 \cdot \cos(\mathbf{j}) - x_2 \cdot \sin(\mathbf{j})$$

$$x_2' = x_1 \cdot \sin(\mathbf{j}) + x_2 \cdot \cos(\mathbf{j})$$

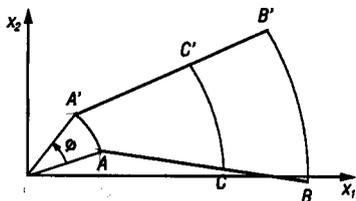


Abb. 3.7 Kongruenzabbildung, vgl. [Bartsch, Seite 229]

Nach der Drehung ergeben sich die neuen Koordinaten  $x'$ , die am Ende noch bezüglich des Ursprungs zurücktransformiert werden müssen. Der Drehwinkel  $\mathbf{j}$  ist der Winkel, den die Geraden Drehpunkt-Quelle und Drehpunkt-Spiegelquelle einschließt (siehe Abb. 3.8). Dazu muss der Winkel  $\mathbf{b}$  bestimmt werden, der sich je nach Position der Quelle unterschiedlich berechnet.

Musterlösung für die Spiegelung einer rechten Spiegelung 1. Ordnung an der linken Wand  
(=linke Spiegelung 2. Ordnung):

z.B.  $S_{r1} = \begin{pmatrix} 3.5 \\ 1 \end{pmatrix}$  (Koordinaten der rechten Spiegelquelle 1.Ordnung)

$g=2.75$  (Abstand Ursprung zur seitlichen Wand)

$g = 80^\circ$

Koordinatentransformation:  $S_{sr1}' = \begin{pmatrix} 3.5 + 2.75 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.25 \\ 1 \end{pmatrix}$

$\tan(\mathbf{b}) = \frac{1}{3.5 + abstm} = \frac{1}{6.25} \rightarrow \mathbf{b} = 9.1^\circ$

Drehwinkel:  $\mathbf{j} = 2 \cdot (80^\circ - \mathbf{b}) = 141.8^\circ$

$C = \begin{pmatrix} \cos(141.8) & -\sin(141.8) \\ \sin(141.8) & \cos(141.8) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.786 & -0.618 \\ 0.681 & -0.786 \end{pmatrix}$

$S_{sl2v} = C * S_{sr1}' = \begin{pmatrix} -0.786 & -0.618 \\ 0.681 & -0.786 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 6.25 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5.53 \\ 3.1 \end{pmatrix}$

Rücktransformation:

$S_{sl2} = \begin{pmatrix} -5.53 - 2.75 \\ 3.1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8.28 \\ 3.1 \end{pmatrix}$

Die Grafische Kontrolle erfolgt durch Ausmessen der Koordinaten.

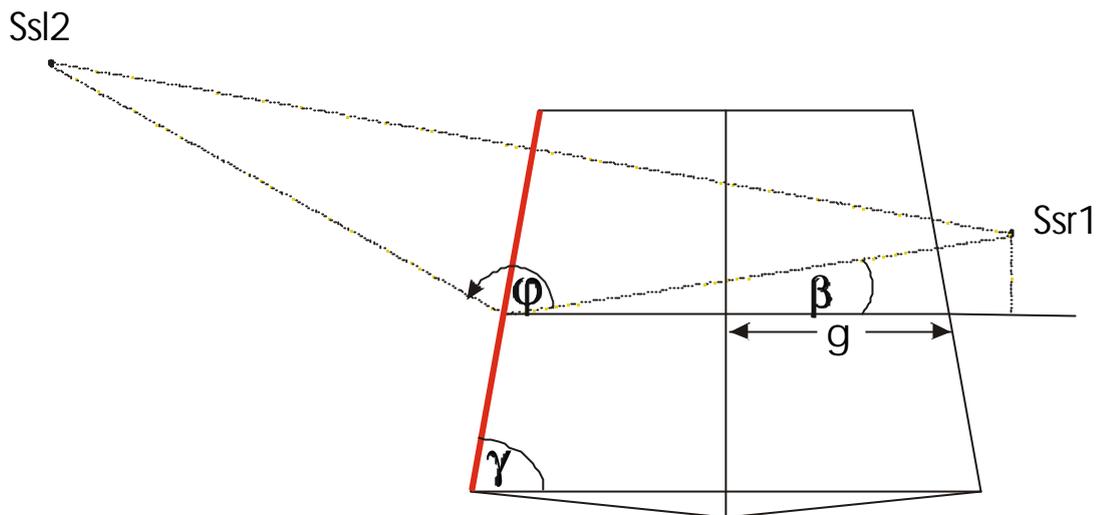


Abb. 3.8: Linke Spiegelung 2.Ordnung

### 3.5 Berechnen eines frequenzabhängigen Reflexionsgrades

Jeder Schallstrahl wird beim Auftreffen auf eine Wand je nach Absorptionsgrad gedämpft. Der Absorptionsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis von absorbiert zu auftreffender Schalleistung.

$$\mathbf{a} = \frac{\text{absorbierte Schalleistung}}{\text{auftreffende Schalleistung}} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Unterschiedliche Materialien haben dabei unterschiedliche frequenzabhängige Absorptionsgrade, wie Tabelle 3.1 zeigt. Im Falle der Reflexion ist man daran interessiert, wie groß der reflektierte Anteil ist. Man verwendet daher den Reflexionsgrad, der sich aus  $1 - \mathbf{a}$  berechnet. Für das Simulationsprogramm werden diese Eigenschaften mit einer frequenzabhängigen Gewichtungsfunktion nachgebildet. An diskreten Frequenzen wird ein spezieller Reflexionsgrad gewählt, zwischen zwei Punkten wird linear interpoliert.

Material	Frequenz					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Glatter Putz	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Poröser Putz 15mm Spritzasbestputz	0.08	0.15	0.31	0.50	0.61	0.71
Bimsbeton unverputzt	0.15	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60
2.5mm dicker Anstrich mit Faserstoff auf Papier	0.02	0.03	0.04	0.07	0.13	0.21
Parkett auf Blindboden	0.20	0.15	0.10	0.10	0.05	0.10
Aufgeklebter Bodenbelag aus Kork, Gummi o.ä.	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.10
Nadelfilzteppich, 7mm	0.02	0.04	0.12	0.20	0.36	0.57
Leerer, hölzerner Klappstuhl	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05
Leerer tiefer Polsterstuhl mit Stoffbespannung	0.28	0.28	0.28	0.28	0.34	0.34
Publikum auf Holzstühlen Durchschnitt für Auditorien	0.15	0.30	0.44	0.45	0.46	0.46
Geschlossenes Doppelfenster	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02

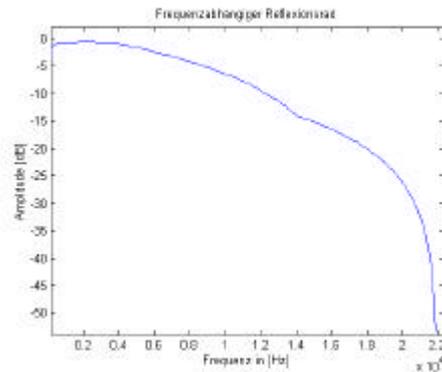
**Tabelle 3.1: Schallabsorptionsgrade nach [Bobran]**

Für die Simulation möchte man beispielsweise die Reflexion an einem Parkettboden berechnen. Die Reflexionsgrade werden nun folgendermaßen gewählt:

Reflexionsgrad	0	0.6	0.8	0.85	0.9	0.9	0.95	0.9	0.2	0
Frequenz	0	50	125	250	500	1000	2000	4000	14000	$f_s/2$

**Tabelle 3.2**

Daraus resultiert folgender frequenzabhängiger Reflexionsgrad



**Abb. 3.9: Frequenzabhängiger Reflexionsgrad zu Tab. 3.2**

Da mit jeder Reflexion eine andere Wand getroffen wird, müssen unterschiedliche Reflexionsgrade berücksichtigt werden. Im Fall des Musikseminarraums werden 4 unterschiedliche Reflexionsgrade realisiert: Einer für die vordere Wand und die Seitenwände, einer für die Rückwand (z.B. geschlossenes Doppelfenster), einer für den Boden und einer für die Decke. Trifft ein Schallstrahl zuerst an die vordere Wand, so bekommt er den vorderen Reflexionsgrad zugewiesen, wird dieser nun an die hintere Wand reflektiert, den hinteren, usw.. Es zeigt sich, dass die „Geschichte“ jedes Schallstrahls mitverfolgt werden muss, um beispielsweise nach der 4. Reflexion die richtigen Reflexionsgrade multiplizieren zu können. Wird der vereinfachte Grundriss des Musikseminarraumes betrachtet, kann eine Quelle im besten Fall 5 Spiegelquellen erzeugen. Eine Spiegelquelle kann jedoch höchstens 4 weitere Spiegelquellen hervorrufen. Um Speicherplatz zu sparen, wurde der Vektor, indem die Spiegelquellen 2. Ordnung aus einer Richtung (z.B. seitliche Spiegelung) zusammengefasst werden, auf 4 Spalten reduziert. Die Spalten werden dabei je nach „Herkunft“ ausgetauscht. Eine Lösungsmethode, die sich bei der Berücksichtigung der Reflexionsgrade als Nachteil herausstellte, da die Geschichte jeder Spiegelquelle nicht so leicht zurückverfolgt werden kann.

Zusammenfassend:

Eine Schallquelle erzeugt für den Grundriss des Musikseminarraumes maximal 5 Spiegelquellen 1. Ordnung. Diese werden in einem Vektor zusammengefasst, der mit Sordn bezeichnet wird.

$$\text{Sordn1}=[\text{Sv1 Ss1l Ssr1 Shl1 Shr1}]; (\text{Sv1...vordere Spiegelquelle 1.Ord. usw.})$$

Jede Spiegelquelle kann maximal 4 weitere Spiegelquellen erzeugen, die in dem Vektor Sordn2 zusammengefasst werden

$$\text{Sordn2}=[\text{Ssr2z},\text{Ssl2z},\text{Shl2z},\text{Shr2z},\text{Sv2z}];$$

Ssr2		Ssl2		Shl2		Shr2		Sv2	
Spalte	rechts (r)	Spalte	links (l)	Spalte	h links (hl)	Spalte	h rechts (hr)	Spalte	vorne (v)
1	v	5	v	9	v	13	v	17	sl
2	sl	6	Sr	10	sl	14	sl	18	sr
3	hl	7	Hl	11	sr	15	sr	19	hl
4	hr	8	hr	12	hr	16	hl	20	hr

**Tabelle 3.3: Spaltenbelegung von Sordn2**

Zur Erklärung sei nun die 1. Spalte aus Tabelle 3.3 exemplarisch betrachtet:

Quellen der rechten Spiegelquelle 2.Ordnung sind also eine vordere Spiegelquelle 1.Ordn., eine seitlich linke Spiegelquelle 1.Ordn., eine hintere linke Spiegelquelle 1.Ordn. und eine hintere rechte Spiegelquelle 1.Ordn..

Die rechte Spiegelquelle 2.Ordnung belegt also im Vektor Sordn2 die Spalten 1 bis 4, die linke Spiegelquelle 2.Ordnung belegt im Vektor Sordn2 die Spalten 5 bis 8, die hintere linke Spiegelquelle 2.Ordnung belegt im Vektor Sordn2 die Spalten 9 bis 12, die hintere rechte Spiegelquelle 2.Ordnung belegt im Vektor Sordn2 die Spalten 13 bis 16, und die vordere Spiegelquelle 2.Ordnung belegt im Vektor Sordn2 die Spalten 17 bis 20. Man erhält nun für Sordn2 20 Spalten (4\*5). Analog verfährt man für Sordn3 und erhält hier 80 Spalten.

Verfolgt man den Weg einer rechten Spiegelquelle 4. Ordnung zurück, so ergeben sich folgende Kombinationsmöglichkeiten (vollständige Tabellen siehe [Dokumentation]):

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.Ordn	v	sr	hl	hr	v	sl	hl	hr	v	sl	sr	hr	v	sl	sr	hl
2.Ordn	sl				sr				hl				Hr			
3.Ordn	Vorne															
4.Ordn	Seitlich rechts															

Spalte	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1.Ordn	sl	sr	hl	hr	v	sl	hl	hr	v	sl	sr	hr	v	sl	sr	hl
2.Ordn	v				sr				hl				Hr			
3.Ordn	Seitlich links															
4.Ordn	Seitlich rechts															

Spalte	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1.Ordn	sl	sr	hl	hr	v	Sr	hl	hr	v	sl	hl	hr	v	sl	sr	hl
2.Ordn	v				Sl				sr				Hr			
3.Ordn	Hinten links															
4.Ordn	Seitlich rechts															

Spalte	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
1.Ordn	sl	sr	hl	hr	v	Sr	hl	hr	v	sl	hl	hr	v	sl	sr	hr
2.Ordn	v				Sl				sr				Hl			
3.Ordn	Hinten rechts															
4.Ordn	Seitlich rechts															

**Tabelle 3.4: Spaltenbelegung von Sordn4**

Das Ziel der Spiegelquellenberechnung ist letztendlich das Finden der Impulsantwort. Dazu wird angenommen, dass eine Schallquelle einen Deltaimpuls aussendet und dessen weiterer „Spiegelweg“ im Raum verfolgt wird.

Der Schalldruck in einer bestimmten Entfernung zur Schallquelle berechnet sich aus dem Modell eines Kugelstrahlers:

$$P(r, f) = \frac{e^{\frac{j \cdot 2\pi f \cdot r}{c}}}{r} \quad \text{Gl. 3.3}$$

- f... Frequenz
- r.. Abstand Quelle (bzw. Spiegelquelle) zum Aufpunkt
- c... Schallgeschwindigkeit

D.h., der Schalldruck nimmt mit der Entfernung zur Schallquelle mit 1/r ab. Für Spiegelquellen wird er mit der Wurzel der oben beschriebenen frequenzabhängigen Gewichtungsfunktion multipliziert. Der Schalldruck jeder Spiegelschallquelle liegt im Frequenzbereich vor. Mit Hilfe der Inversen Diskreten Fourier Transformation (IDFT) wird der gefilterte Impuls in den Zeitbereich transformiert.

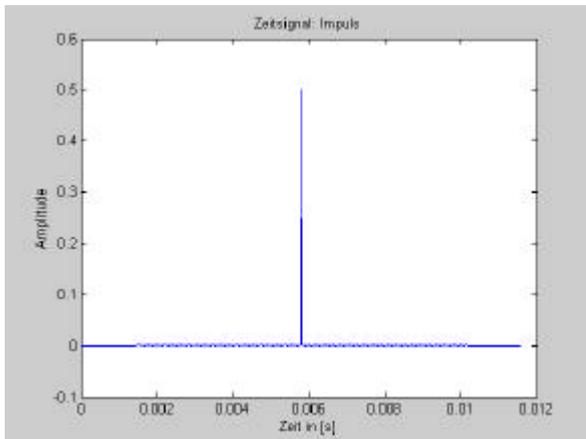


Abb. 3.10: Direktschall

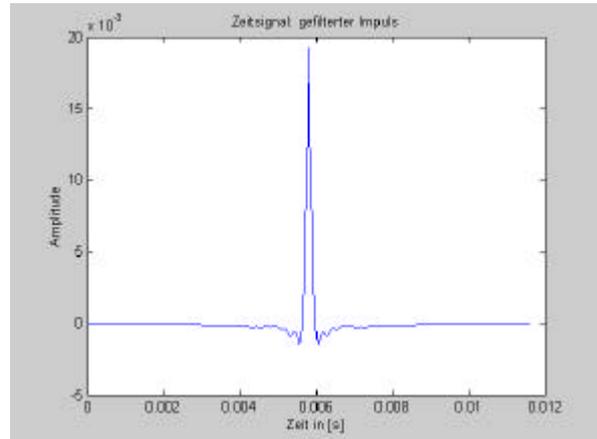


Abb. 3.11: Gefilterter Impuls

Transformation in den Zeitbereich

$$p(r,t) = DFT^{-1}\{P(r,f)\}$$

Sind die Impulse für alle Spiegelquellen berechnet, können sie zu den passenden Zeitpunkten platziert werden, die sich aus dem Abstand Quelle- bzw. Spiegelquelle- Aufpunkt berechnen.

Abstand Quelle Mikro

$$r = \sqrt{QM(x)^2 + QM(y)^2 + QM(z)^2} \quad \text{Gl. 3.4}$$

$$\begin{aligned} QM(x) &= Q(x) - M(x) \\ \text{mit } QM(y) &= Q(y) - M(y) \\ QM(z) &= Q(z) - M(z) \end{aligned}$$

$Q$ ... Quelle,  $M$ ... Mikrofon

Berechnung des Zeitpunktes, zu dem ein Impuls auftritt:

$$t = \frac{r}{c} \cdot 1000 \quad [\text{ms}] \quad \text{Gl. 3.5}$$

c... Schallgeschwindigkeit

Beispiele unterschiedlicher Impulsantworten

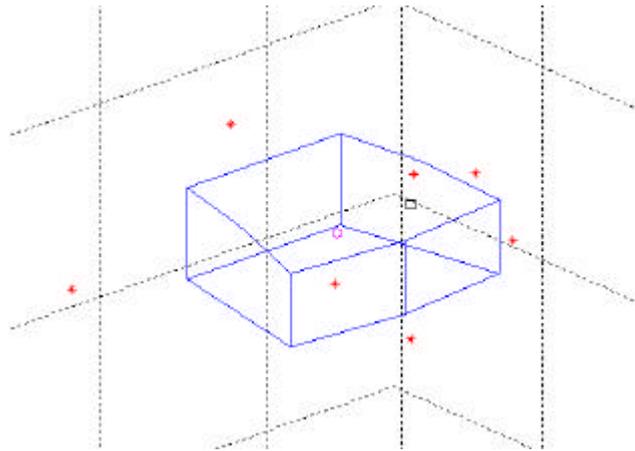


Abb. 3.12: Spiegelquellen 1. Ordnung für einen Lautsprecher (LS15)<sup>1</sup>

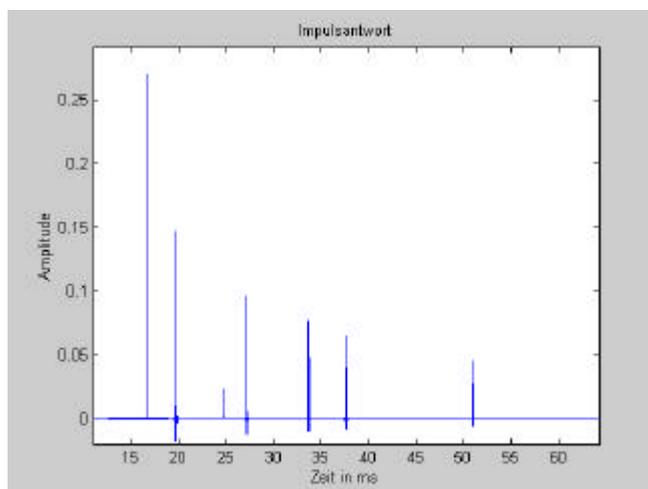
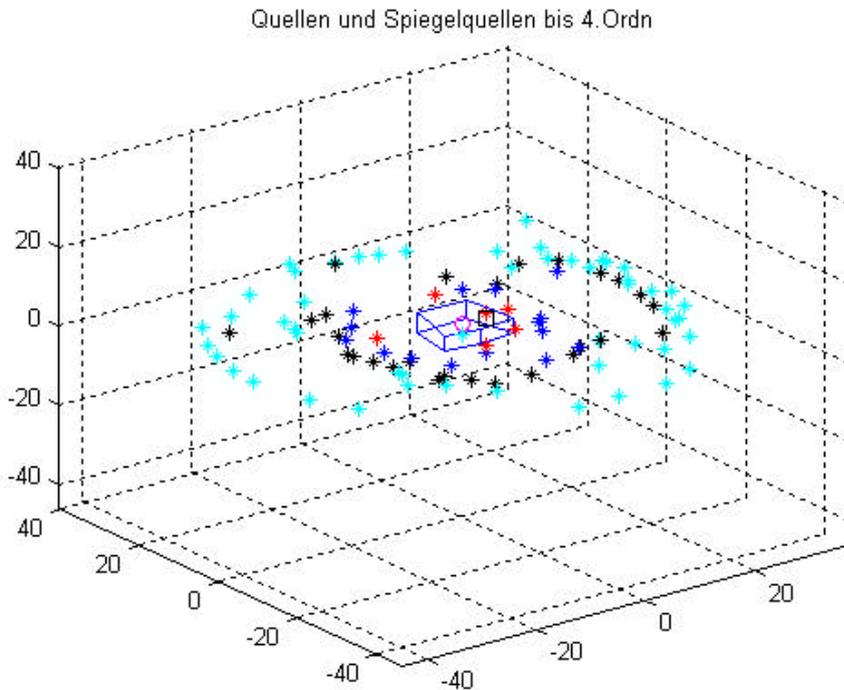


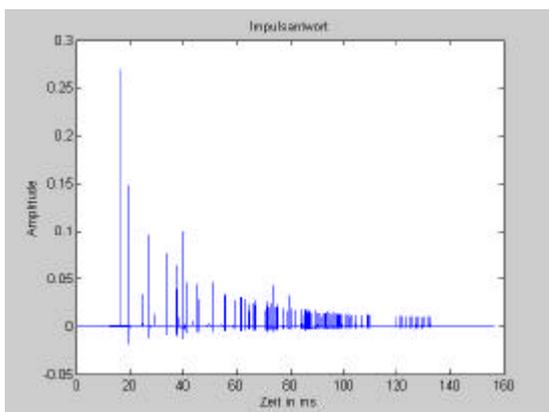
Abb. 3.13: Simulierte Impulsantwort für Spiegelquellen 1. Ordnung von LS 15, Boden schwach reflektierend

<sup>1</sup> Das kleine schwarze Quadrat symbolisiert den Lautsprecher, der Kreis den Aufpunkt (Mikrofon). Bei dem abgebildeten Lautsprecher handelt es sich um den Lautsprecher 15, der im Simulationsprogramm folgende Koordinaten hat: x=3.38m, y=-1.4m, z=3.5m. Wenn es der Textfluß erfordert, wird nun der Lautsprecher mit LS abgekürzt.

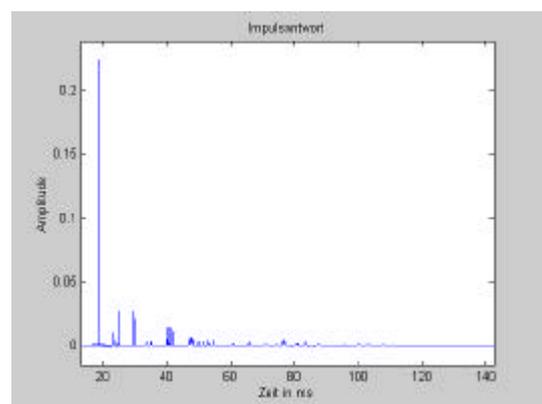
Der erste Peak aus Abb. 3.13 stellt den Direktschall dar, der zweite die Deckenreflexion. Dann folgt die stark gedämpfte Bodenreflexion, und schließlich kommen die Reflexionen der rechten Wand, der hinteren rechten Wand, der vorderen Wand und der linken Wand.



**Abb. 3.14: Spiegelquellen bis zur 4. Ordnung für LS 15 (Skalierung in Meter)**



**Abb. 3.15: Simulierte Impulsantwort für LS 15 zu Abb. 3.14, alle Wände stark reflektierend (Spiegelquellen bis zur 4. Ordnung)**



**Abb. 3.16: Simulierte Impulsantwort für, LS 15, sehr trockener Raum (Spiegelquellen bis zur 4. Ordnung)**

## 4 Einführung zu elektroakustischen Systemen

---

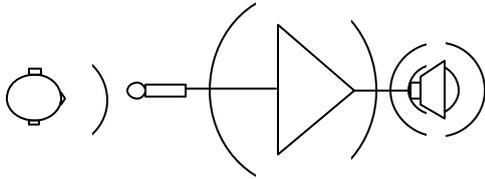
Ein elektroakustisches System muss vielfältige Aufgaben erfüllen. Diese reichen von der Erweiterung der Dynamik, über die akustische Beherrschung des Wiedergaberaumes bis zur Realisierung von bestimmten Raumklangeffekten. Meist gilt es auch raumakustische Defizite eines bestehenden Raumes ohne architektonische Veränderungen auszugleichen. Dies kann z.B. die Verbesserung des akustischen Gleichgewichts zwischen Teilen einer musikalischen Darbietung oder die Verbesserung von Deutlichkeit und Durchsichtigkeit sein. In dieser Arbeit werden zuerst die Prinzipien einiger bestehender elektroakustischer Systeme untersucht, wobei auf zwei dieser Systeme näher eingegangen wird.

In fast allen Systemen begrenzt die durch die Rückkopplung entstehende Klangfarbenfärbung die Funktion des Systems. Akustische Rückkopplung wird durch alle Systemfaktoren beeinflusst und setzt letztendlich fest, wie hoch der größtmögliche Hallpegel sein wird. Diese Klangfarbenfärbung kann reduziert werden durch

- Positionieren der Mikrofone (relativ zur Quelle und zum Wiedergabesystem)
- Verringerung des Systempegels durch eine Reduktion der Systemverstärkung
- Erhöhen der Anzahl der unabhängigen Kanäle
- Hinzufügen einer Form von Zeitvarianz
- Bei der Verwendung eines „sekundären Raums“ durch eingeschlossene Hallalgorithmen (Dekorrelation)

Die mittlere Schleifenverstärkung  $\overline{g}$  gibt den Betrag der akustischen Rückkopplung an. Sie wird erhalten, indem man die gesamte Energie des Lautsprechers ( $W_{LS}$ ), die vom Mikrofon aufgenommen wurde durch die gesamte Energie der Schallquelle, die vom Mikrofon aufgenommen wurde ( $W_Q$ ), dividiert (vgl. Abb. 4.1).

$$\overline{g} = \frac{W_{LS}}{W_Q}$$



**Abb. 4.1: Akustische Rückkopplung mit einem Mikrofon und einem Lautsprecher, vgl. [Griesinger, 1]**

In einem Breitbandsystem wird die Schleifenverstärkung über den Durchschnitt über alle Frequenzen ermittelt. Die Übertragungsfunktion zwischen Lautsprecher und Mikrofonen weist allerdings je nach Frequenz viele Spitzen und Täler auf. Die Schleifenverstärkung ist daher bei manchen Frequenzen höher, was dazu führt, dass diese speziellen Frequenzen aus der Übertragungsfunktion hervorstechen. Man verstärkt also zusätzliche Raumresonanzen, wodurch einzeln ausgeprägte „Stehwellen“ übrig bleiben. Nach Schroeder wird die Annahme getroffen, dass die Mikrofone und Lautsprecher um mehr als den Hallradius voneinander getrennt sein müssen, bevor dieser Effekt eintritt.

$$f_{schroeder} \approx 2000 \sqrt{\frac{T_N}{V}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

$T_N$ ... Nachhallzeit,  $V$ ... Raumvolumen

Die maximale Verstärkung hängt von der Nachhallzeit des Raumes und von der Bandbreite des Systems ab und ist immer niedriger als 1. Nimmt man ein Breitbandsystem und eine Nachhallzeit von 2 Sekunden an, beträgt die maximale Schleifenverstärkung ca. –12dB (vgl. [Griesinger 1]). Zusätzlich berücksichtigt man einen ‘Headroom’ von 8dB, um eine offensichtliche Verfärbung in einem Breitbandsystem zu vermeiden. Für ein qualitativ hochwertiges RAK-System ergibt dies in Summe eine Schleifenverstärkung von maximal –20dB.

#### 4.1 Natürlicher Hallradius und Hallradius eines RAK<sup>1</sup> Systems

Der Hallradius ist definiert als jener Abstand zur Schallquelle, bei dem das Verhältnis von Direktschall und diffusem Anteil gleich groß ist (siehe Kapitel 1.3). Er ist dabei ein Maß für den Hallpegel im Raum. Wird die Raumakustik durch ein elektroakustisches System verändert, ändert sich auch der Hallradius. Griesinger bezeichnet diesen Abstand als 'enhancement critical distance' ECD, der hier als elektroakustischer Hallradius eingeführt wird ( $HR_{EAK}$ ). Mit einem Kugelmikrofon ergibt sich nun die zulässige Schleifenverstärkung  $S_d$  durch Division des Abstandes von Schallquelle zu Mikrofon ( $d_{SM}$ ) durch den  $HR_{EAK}$ .

$$S_d = \frac{d_{SM}}{HR_{EAK}} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Ist der elektroakustische Hallradius kleiner als der natürliche Hallradius, liefert das elektroakustische System den größten Anteil der Hallenergie. Im umgekehrten Fall resultiert daraus ein doppelter Abfall.<sup>2</sup> In beiden Fällen bestimmt der elektroakustische Nachhall die Stabilität des Systems.

#### 4.2 System mit einem Mikrofon

Die Stabilität wird aus der Schleifenverstärkung berechnet. Für ein Einkanalssystem mit einem Kugelmikrofon ergibt sich, wenn man die Forderung der oben angeführten  $-20\text{dB}$  berücksichtigt:

$$S_d = \frac{d_{SM}}{HR_{EAK}} \leq \frac{1}{10} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Möchte man einen elektroakustischen Hallradius erreichen, der 7 Meter entspricht, resultiert daraus ein Abstand des Mikrofons zur Quelle von 70cm

$$d_{sm} = \frac{1}{10} \cdot 7$$

---

<sup>1</sup> RAK... Raumakustik

<sup>2</sup> Der Pegel des Direktsignals wird durch das elektroakustische System erhöht. Wenn sich der Hallradius des Raumes dabei nicht wesentlich verändert, ist der Abfall des Direktsignals steiler.

Ist die durch das System rückgekoppelte Energie in allen Richtungen gleich groß, ist ein Nierenmikrofon, das auf die Quelle ausgerichtet ist, 3 mal so empfindlich für den Direktschall bei einem fixen Betrag an Rückkopplung.<sup>1</sup> Daher kann es um den Faktor  $\sqrt{3}$  weiter entfernt von der Quelle positioniert werden, d.h.  $d_{SM}=120\text{cm}$ . Für ein Hypernierenmikrofon ergibt sich ein Faktor 2.

$HR_{EAK}=7\text{m}$	Kugelmikrofon	Nierenmikrofon	Hypernierenmikrofon
Abstand zur Quelle	70cm	120cm	140cm

**Tabelle 4.1**

Mit diesen Abständen zur Quelle lassen sich bereits Aufführungen, die sich auf einen kleinen Teil der Bühne konzentrieren (z.B. Solomusiker) mikrofonieren, allerdings ergeben sich Probleme bei größeren Aufstellungen, wie sie beispielsweise ein Orchester erfordert, da ja der große Dynamikbereich und die Richtwirkung der einzelnen Instrumente in die Bestimmung des Hallradius eingehen<sup>2</sup>.

### 4.3 System mit mehreren Mikrofonen

Hier werden mehrere Mikrofone in einem Array angeordnet und vor der Verhallung zu einem Monosignal zusammengemischt. Für eine Untersuchung der Stabilität muss die aufgenommene rückgekoppelte Energie von jedem Mikrofon berücksichtigt werden. Wenn man annimmt, dass das Feedback aller Mikrofone unkorreliert ist, erhält man für zwei zusammengemischte Mikrofone um 3dB mehr Hall als für eines. Die daraus resultierende Verstärkung, bevor Rückkopplung eintritt, muss also um 3dB geringer sein. Für ein Array aus 12 Mikrofonen reduziert sich die Verstärkung um  $\sqrt{12}$ . Das Mischen von Mikrofonen erhöht die Rückkopplung:

$$\frac{d_{SM}}{HR_{EAK}} \leq \frac{0.173}{\sqrt{\text{Anzahl an Mikrofone}}} \quad \text{Gl. 4.4 (vgl. [Griesinger 1])}$$

---

<sup>1</sup> Für gerichtete Mikrofone kann aus dem Polardiagramm für die Richtwirkung der Richtgrad bestimmt werden.

<sup>2</sup> Eine Beschreibung des Hallradius findet sich in Kapitel 1.3.2

Möchte man für ein Array aus 12 Mikrofonen die -20dB Bedingung für die Schleifenverstärkung erreichen, muss jedes Mikrofon in einem Abstand von 30cm zu jeder Quelle positioniert sein (eine praktisch nicht realisierbare Bedingung). Stabilität ergibt sich durch Betrieb bei geringen Ausgangspegeln. Dies führt dazu, dass ein solches System z.B. nur in den Pausen eines Musikstückes gehört werden kann.

### 4.4 Raumakustik Systeme – eine Auswahl

Die hier gezeigte Auswahl gibt einen Einblick in die verschiedenen technischen Realisationsmöglichkeiten von RAK Systemen.

#### 4.4.1 CMS

CMS	Closely Miked Systems
-----	-----------------------

Die Mikrofone werden sehr nahe an der Quelle positioniert, wodurch nützliche akustische Energie bereits bei geringer Schleifenverstärkung generiert werden kann. Fügt man in den Systempfad einen künstlichen Hall ein und verwendet räumlich verteilte Lautsprecher, erhält man ein einfaches System zur Veränderung der RAK. Die Qualität eines solchen Systems hängt neben der Qualität des Hallgerätes und der Lautsprecher Positionierung vor allem davon ab, wie nahe sich die Mikrofone bei der Quelle positionieren lassen.

#### 4.4.2 Mehrkanal Hall

MCR	Multichannel Reverberation
Entwickler	Franssen

Akustisches Feedback wird verringert, indem die Anzahl der unabhängigen Kanäle vergrößert wird. Jeder dieser Kanäle besteht aus einem Mikrofon, einem Verstärker, einer Verzögerung oder einem Hallgerät und einem oder mehreren Lautsprechern. Werden die Mikrofone so platziert, dass alle einzelnen Kanäle statistisch voneinander unabhängig sind, ergibt sich eine Gesamtleistung, die sich aus der Summe der Einzelleistungen der Kanäle zusammensetzt.

Fordert man, dass die Verstärkung jedes Kanals unter 20dB liegt, bedeutet das, dass ein einzelner Breitbandkanal ohne Hallgerät die Nachhallzeit eines Raumes um 1% erhöhen kann. Grundlegend ist dabei, dass die Performance (der Hallpegel oder der Abstand Quelle-Mikrofon) eines solchen Systems proportional zur Wurzel aus der Anzahl der Kanäle ist. Dies kann zu einer sehr hohen Anzahl an Kanälen führen (bis zu 1000). Da aufgrund dieser großen Anzahl nicht mehr alle Mikrofone in der Nähe der Quelle positioniert werden können, werden diese im gesamten Raum verteilt. Zusätzlich sollte eine Verzögerung in der Größenordnung des freien Raumweges vorgesehen werden (vgl. [Franssen]). Die Sinnhaftigkeit eines solchen Systems kann in Hinblick auf den enormen Hardwareaufwand und die damit verbundenen Kosten in Frage gestellt werden.

### 4.4.3 ACS

ACS	Acoustic Control System
Entwickler	Berkhout

Eine große Anzahl an Mikrofonen wird in der Nähe der Quelle positioniert, die mit einer großen Anzahl an Lautsprechern über eine Verzögerungsmatrix miteinander verbunden werden. Die Verzögerungsmatrix wird für jede Aufstellung individuell berechnet. Diese Verzögerungsmatrix beruht auf Verzögerungspfaden und Spiegelquellen, die sich durch eine größere ideale Halle, die um die bestehende Halle herum „gebildet“ wird, ergäben. Wenn das System auch nicht für maximale Stabilität ausgelegt ist, so kann die Stabilität doch durch Einfügen von Zeitvarianz in den Matrixanschlüssen verbessert werden (vgl. [Berkhout]). Dieses System ist sehr aufwendig und teuer in der Realisierung.

### 4.4.4 RODS s

RODS	Reverberation on Demand System
Entwickler	Peter Barnet

Es handelt sich hier um ein nichtlineares System, bei dem ein Mikrofonsignal ein Gatter passiert, bevor es eine Verzögerungslinie mit abgezwigten Gliedern erreicht. Dieser Ausgang passiert ein ähnliches Gatter. Eine Steuerlogik öffnet das Eingangsgatter und schließt das Ausgangsgatter, wenn das Mikrofonsignal konstant ist oder steigt. Sie schließt

das Eingangsgatter und öffnet das Ausgangsgatter, wenn der Pegel sinkt. Dadurch ist eine akustische Rückkopplung ausgeschlossen, allerdings wird bei diesem System die seitliche Energie bei kontinuierlicher Musik nicht erhöht, wodurch das System für Musikdarbietungen nicht geeignet ist.

### 4.4.5 ARS

ARS	Assisted Resonance System
Entwickler	P. Parkin

Hier handelt es sich um ein älteres System (60er Jahre), bei dem die Mikrofone nicht in der Nähe der Bühne platziert werden. Ziel ist es, die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen der Royal Festival Hall in London zu vergrößern. Das System setzt eine Anzahl von schmalbandigen Kanälen ein, von denen jeder aus einem Mikrofon, das sich in einem Helmholtz Resonator (abgestimmt auf einen niedrigen Raummode) befindet, einem Verstärker und einem Lautsprecher besteht. Ein Phasen Schieber sorgt für positive Rückkopplung bei dem ausgesuchten Raummode, um die Dämpfung zu reduzieren. Die verschiedenen Kanäle (mehr als 100) werden auf unterschiedliche Moden abgestimmt, was schließlich zu einer bemerkenswerten Verbesserung der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen führt (vgl. [Parkin, Morgan]).

### 4.4.6 SIAP

SIAP	System for Improved Acoustic Performance
Entwickler	W. Pronssen, M.Holden

Dieses System strebt eine Verbesserung der Raumakustik an, ohne das Prinzip der akustischen Rückkopplung zwischen den Lautsprechern und den Mikrofonen auszunützen, wobei es besonderen Augenmerk auf Beibehaltung des akustischen Charakters der Halle legt. Eingesetzt werden Hypernierenmikrofone, die sich in der Nähe der Bühne befinden. Diese nehmen hauptsächlich Direktschall und einen geringeren Anteil an Diffusschall auf. Der Direktschall wird leicht verhallt und eventuellen Klangverfärbungen wird mit Einsatz von zeitvarianten Techniken vorgebeugt. Das Raumvolumen darf sich nicht merkbar vergrößern, da dies zu einem Widerspruch zwischen dem visuellen und akustischen Raumeindrucks

führen könnte, der nach Meinung der Entwickler unbedingt vermieden werden sollte (vgl. [Prinssen, Holden]).

### 4.4.7 CARMEN

Entwickler	J. P. Vian, X. Meynial
------------	------------------------

Das zugrundeliegende Prinzip ist jenes einer aktiven Mauer, deren Absorptionskoeffizient elektronisch verändert werden kann. Sogenannte aktive Zellen werden, von denen jede aus einem Mikrophon, einer elektronischen Einheit und einem Lautsprecher besteht, auf einer Wand montiert. Eine bestimmte Anzahl von Zellen bildet eine virtuelle Wand. Jede Zelle verursacht ein abfallendes Set an Reflexionen für eine einzeln einfallende Schallwelle, vorausgesetzt, dass die Zellenverstärkung innerhalb des Stabilitätsbereiches liegt. Wird die Rückkopplung zwischen jedem Zellmikrofon und einem Lautsprecher verhindert, dann erzeugt die Zelle nur eine einzelne Reflexion, deren Amplitude variiert werden kann. Zusätzlich kann das Mikrofonsignal elektronisch verzögert werden, wodurch die Position der Zelle außerhalb der Mauer verschoben werden kann, was eine Vergrößerung des Raumvolumens bewirkt (vgl. [Vian, Meynial]).

### 4.4.8 LARES und VRAS

Eine ausführliche Beschreibung dieser zwei Systeme erfolgt im nächsten Kapitel.

## 5 Vergleich von LARES mit VRAS – Zwei Grundideen

---

Grundsätzlich lassen sich Hallsysteme in zwei große Kategorien unterteilen. Einerseits in 'In line' Systeme, andererseits in 'Non in line' Systeme. Ziel der 1. Gruppe ist eine Detektion des Direktschalls, weshalb die Mikrofone möglichst nahe zur Schallquelle positioniert werden sollten. Die Mikrofone der 2. Gruppe werden hingegen im Diffusfeld platziert und nehmen daher das Hallfeld auf. Die derzeitige Entwicklung geht jedoch eher in die Richtung einer Kombination der beiden Systeme, um die auftretenden Nachteile der Einzelsysteme zu kompensieren. Diese Systeme werden Hybrid Systeme genannt. Die beiden Grundideen werden anhand zweier existierender Systeme im Folgenden vorgestellt.

### 5.1 'In line Systeme'

Bei 'in line Systemen' erfolgt, wie bereits beschrieben, die Mikrofonaufstellung in der Nähe der Quelle, um das Verhältnis des Direktsignals zum Hallsignal zu maximieren. Da sie primär Direktsignal aufnehmen, können sie leicht lokale Eigenschaften der RAK für Quellen auf der Bühne erhöhen. Zu nennen sind hier Klarheit, offensichtliche Quellweite (ASW) und Anfangsnachhallzeit (EDT). Diese Systeme bringen die „Information“ der Bühne (z.B. Musik) besser zu den Zuhörern. Die Gefahr einer akustischen Rückkopplung wird durch den niedrigen Diffusanteil minimiert, was allerdings eine vielleicht erwünschte Rückwirkung des Publikums (z.B. Klatschen,...) oder eventuelle Aufführungen, die auch das Auditorium einbeziehen (wandernde Musiker, etc.), praktisch unmöglich macht. Dieses Problem kann mit Hilfe zusätzlicher Subsysteme, die Mikrofone im Auditorium vorsehen, verhindert werden. Ein weiterer Nachteil eines 'in line Systems' ist die Lautsprecheraufstellung. Da sich manche Zuhörerplätze in der Nähe der Lautsprecher befinden können, kann dort das Lautsprechersignal den Höreindruck dominieren.

### 5.2 'Non in line' Systeme

Die Mikrofone werden hier im Zuhörerraum positioniert, um hauptsächlich den Diffusschall aufzunehmen. Diese Systeme eignen sich gut, um globale raumakustischen Eigenschaften wie Lautheit, Nachhallzeit und 'envelopment' zu erhöhen. Der Abstand von Mikrofon zur Quelle

sollte größer als der Hallradius sein. Dieser Abstand muss auch zwischen Mikrofonen und Lautsprechern eingehalten werden, um einem Instabilitätsrisiko und möglichen Klangverfärbungen vorzubeugen (über der Schröder Frequenz - siehe Gl. 4.1). Die Mikrofonensignale sollten außerdem untereinander unkorreliert sein.

Ein Nachteil bei 'non in line' Systemen ist, dass sie zwar eine Vielzahl an frühen Reflexionen erzeugen können, diese allerdings nur einen sehr geringen Pegel aufweisen. Daher können sie die lokalen raumakustischen Eigenschaften nur minimal beeinflussen (Die Mikrofone werden typischerweise so positioniert, dass das System seine ersten Reflexionen vor der Mixzeit<sup>1</sup> erzeugt. Dadurch kann es die Feinstruktur der frühen Impulsantwort verändern, was die Textur verbessert).

Der Entwurf erfolgt durch Bestimmen der Anzahl der Kanäle und der Schleifenverstärkung, die eine gewünschte Verstärkung des eingeschwungenen Zustandes, bei akzeptablen Klangverfärbungen sichert. Wird ein Hallgerät eingeschliffen, kann das System die Nachhallzeit unabhängig von der Schleifenverstärkung und des eingeschwungenen Zustandes erhöhen, indem es das scheinbare Raumvolumen vergrößert.

### 5.3 LARES - Verbesserung der RAK durch zeitvarianten künstlichen Hall

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Eigenschaften des LARES Systems<sup>2</sup>, welches von David Griesinger (vgl. [Griesinger 1 u. 5]) entwickelt wurde.

#### 5.3.1 Grundlage

Die Grundlage des LARES Systems bilden zeitvariante Hallgeräte (z.B. Lexicon 480L). Das System besteht aus einer geringen Anzahl von Mikrofonen, die so nahe wie nur möglich zur Bühne positioniert werden, wenigstens 4 Lautsprecher Gruppen und einer großen Anzahl an unabhängigen zeitvarianten Hallgeräten, die eine Verbindung zwischen den Mikrofonen und den Lautsprechern herstellen.

---

<sup>1</sup> Die Mixzeit ist jener Zeitpunkt, wo die Reflexionen so dicht werden, dass nicht mehr zwischen unterschiedlichen Reflexionen unterschieden werden kann.

<sup>2</sup> LARES... Lexicon Acoustic Reinforcement and Enhancement System

Sind beispielsweise 2 Mikrofone und 8 Lautsprechergruppen vorhanden, ergeben sich  $2 \cdot 8 = 16$  Anschlusswege zwischen jedem Mikrofon und jedem Lautsprecher. Jeder dieser Anschlüsse wird durch ein Hallgerät realisiert. Die Signale an den einzelnen Hallgeräteausgängen müssen dekorreliert sein, d.h. die Hallgeräte müssen unterschiedliche Impulsantworten haben.

### 5.3.2 Stabilität

Aus dem Gesichtspunkt der Stabilität erfüllen die Hallgeräte zwei Funktionen:

- Sie bringen ein Zufallselement in die Mikrophonesignale ein, das es einem einzelnen Mikrofon aus dem Gesichtspunkt der Stabilität so zu agieren erlaubt, als wären es eine Anzahl unabhängiger Mikrofone. Die Mikrophonesignale können daher nach der Verhallung zusammengemischt werden, ohne einen Verlust an Stabilität zu verursachen, der z.B. beim CMS System auftritt. Das System wirkt in Punkto Stabilität so, als hätte es eine gleich große Anzahl an Kanälen wie Hallgeräte vorhanden sind, was idealerweise das Produkt aus der Anzahl der Mikrophone mit der Anzahl der LS Gruppen ist.
- Zeitvariante Hallgeräte erhöhen die Stabilität eines Systems um mindestens 6dB ([Griesinger 1]) dadurch, dass sie Resonanzen in der Raumübertragungsfunktion verbreitern können. Mit Hallgeräten, deren Dekorrelation sehr groß ist, kann die durchschnittliche Schleifenverstärkung in jedem Kanal  $-12\text{dB}$  betragen, was eine Verbesserung zu einem herkömmliche System um 8dB bedeutet.

### 5.3.3 Berechnung des erforderlichen Abstandes zur Quelle

Die Stabilitätsbedingung bedingt eine Reduktion der Verstärkung um 12 dB. Durch das Hinzufügen von Zeitvarianz können die -6dB, die zur zusätzlichen Sicherheit erforderlich sind, ausgeglichen werden. Die Verwendung eines Nierenmikrofons erhöht die Verstärkung um 4.8 dB ebenso wie jedes zusätzliche Hallgerät. Mit Mikrofonen mit nierenförmiger Charakteristik folgt daher:

$$20 \log \frac{d}{HR_{EAK}} \leq \begin{array}{l} -12\text{dB Stabilität} \\ -6\text{dB Sicherheit} \\ +6\text{dB Zeitvarianz} \\ +4.8\text{dB Nierenmikrofon} \\ +10\log(\text{Anzahl der Hallgeräte}) \end{array}$$

Gl. 5.1 (vgl. Griesinger 1)

$d$ ...Abstand zur Schallquelle

dies vereinfacht sich zu

$$\frac{d}{HR_{EAK}} \leq \frac{\sqrt{\text{Anzahl an Hallgeräte } n}}{2.3} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Die Gleichung kann verallgemeinert werden, wenn man berücksichtigt, dass die Mikrofone vor dem Hallgerät gemischt werden können:

$$\frac{d}{HR_{EAK}} \leq \frac{\sqrt{\frac{\text{Anzahl an Hallgeräte } n}{\text{Anzahl an Mikrofonen je Eingang}}}}{2.3} \quad \text{Gl. 5.3}$$

Ist der kleinste mögliche Abstand zur Quelle bekannt, kann aus Gleichung 5.3 die Anzahl der erforderlichen Hallgeräte berechnet werden. Vergleicht man das System, das mehrere Hallgeräte benützt und keine Mikrofonensignale mischt, mit einem Einkanalssystem mit 12

gemischten Mikrofonen, sieht man, dass der Abstand zur Quelle um das 35 -fache überschritten werden kann.

Einkanalsystem, das 12 Mikrofone mischt:

$$\frac{d}{HR_{EAK}} \leq \frac{0.173}{\sqrt{\text{Anzahl an Mikrofonen}}}$$

Um hier eine -20dB Schleifenverstärkung zu erreichen, müsste das Array in einem Abstand von ca. 30 cm zur Quelle positioniert werden (bei einem  $HR_{EAK}$  von 7m).

#### 5.3.4 Probleme, die sich aus der Zeitvarianz ergeben

Auf jeder veränderlichen Verzögerung muss interpoliert werden, damit der Ausgang kein inakzeptables Klicken aufweist. Zusätzlich tritt eine Tonhöhenveränderung auf, die mit jeder Verzögerungsänderung zusammenhängt. Griesinger hat dabei einen Algorithmus entwickelt, der die Gefahr der Tonhöhenverschiebung für eine Änderung der Verzögerung minimiert. Dennoch ist in einem Einkanalsystems der Spielraum für Klangverfärbungen und Tonhöhenverschiebungen sehr klein.

Poletti beschreibt in [Poletti, 4] zwei wesentliche Nachteile, die sich aus der Zeitvarianz ergeben. Einerseits ist dies die sich ergebende Frequenzverschiebung (dabei werden die Harmonischen verändert), die die Harmonie von Musiksignalen vor allem bei tiefen Frequenzen stört, andererseits ist dies der Nachteil der erschwerten Beurteilbarkeit des Systems, da die Impulsantwort ja nur für zeitinvariante Systeme definiert ist und daher herkömmliche Meßmethoden wie beispielsweise der MLS<sup>1</sup>-Algorithmus nicht verwendet werden kann. Auch die Tonhöhenverschiebung sei problematisch, da diese zwar die Harmonie der Frequenzen wahrt, allerdings bei manchen Frequenzen eine Amplitudenmodulation hervorrufen kann.

---

<sup>1</sup> MLS...Maximallängenfolge

In dem von ihm entwickelten System (siehe Kapitel 5.4) rät er nur im Ausnahmefall zum Hinzufügen von Zeitvarianz, und auch nur dann, wenn eine überdurchschnittlich hohe Schleifenverstärkung gefordert ist. Bessere Ergebnisse liefert jedoch in einem solchen Fall ein System mit einer höheren Anzahl an Kanälen. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Systeme liegt also in der Behandlung von Zeitvarianz.

### 5.3.5 LARES Beispiele

Hier werden zwei Anwendungen des LARES Systems kurz vorgestellt. Weitere Beispiele finden sich u.a. in [Griesinger, 5].

#### Elgin Theater

Das Elgin Theater bietet Platz für 1500 Zuhörer, das Volumen beträgt  $82296\text{m}^3$  ohne den Bereich unter dem Balkon, mit diesem Platz eingerechnet  $97536\text{m}^3$ . Die Decke ist relativ nieder und trägt sowohl zu einer hohen Verständlichkeit, als auch zu einer kurzen Nachhallzeit bei.

Der breite Balkon bedeckt  $\frac{2}{3}$  der Flursitze. Die Deckenhöhe über dem Balkon ist gering, an manchen Plätzen sogar unter 3.4m. Die Nachhallzeit über dem Balkon liegt bei 1 Sekunde bei mittleren Frequenzen, wenn die Halle leer ist, wobei sie auf bis zu 2.5 Sekunden bei 100Hz ansteigt. Unter dem Balkon gibt es praktisch keinen Hall.

#### Ziele:

Einerseits sollte die seitliche Energie vergrößert werden, andererseits der Hallpegel und die Nachhallzeit unter dem Balkon. Außerdem musste das System unsichtbar sein und durfte keine Klangveränderungen hervorrufen. Man entschied sich für 120 Lautsprecher mit einem linearen Frequenzgang und einer unteren Grenzfrequenz von 60Hz. Da 2 LARES Prozessoren eingesetzt wurden, ergaben sich 8 Ausgangskanäle. Dies ermöglichte ein Mischen von 2 Eingangskanälen und eine Ansteuerung von 16 Hallgeräten. Die LARES Prozessoren hatten dabei integrierte Zeitverzögerungen, sodass keine zusätzlichen digitalen Effektgeräte benötigt wurden.

Die 8 Ausgänge wurden 8 Gruppen von Lautsprechern zugewiesen, die in einem bestimmten Muster arrangiert wurden. Angrenzende Lautsprecher wurden nicht vom gleichen Ausgang

angesteuert. Durch diese fehlende Kohärenz zwischen den Lautsprechern stieg die scheinbare Diffusität des Systems, und die Klangverfärbungen reduzierten sich.

Sind die Mikrofone nahe genug zur Bühne angeordnet, kann man die Nachhallzeit und den Hallpegel unabhängig kontrollieren. Dies ist in Hinsicht einer vielseitigen Nutzung des Theaters von Interesse. So kann für die unterschiedlichen Anwendungen des Raumes wie z.B. für Sprachdarbietungen der optimale Hallpegel eingestellt werden.

Experimente (vgl. [Griesinger, 1]) ergaben folgende Hallpegel in Bezug zur symphonischen für die jeweilige Anwendung:

Symphonische Musik	Sprache	Oper	Unbegleitetes Singen	Begleitetes Singen
0dB	-6dB	Werte dazwischen	+2dB	+4dB

**Tabelle 5.1 Optimaler Hallpegel, nach [Griesinger,1]**

Als Mikrofone wurden 2 B&K<sup>1</sup> Nieren Mikrofone gewählt, die in einem Abstand von 15 Metern zur Bühne positioniert wurden.

#### Berliner Staatsoper

Die Berliner Staatsoper ist ein Beispiel, wo bereits Erkenntnisse aus der Psychoakustik bei dem Entwurf berücksichtigt wurden (siehe Kapitel 2.3). Durch die relativ kleine Bühne, ein kleines Proszenium und einer durchschnittlichen Nachhallzeit von unter 1 Sekunde erzeugt der Saal einen intimen Charakter bei sehr guter Sprachverständlichkeit. Dies sind ideale Voraussetzungen für Sprachdramen. Bei romantischer Orchestermusik wie jene von Strauß und Wagner zeigt sich allerdings ein unzureichendes ‘envelopment’, dessen Grund in einem Fehlen an frühen Reflexionen liegt.

Bei der Realisation des LARES Systems 1996 wurden die bestehenden 8 Lautsprecher auf der Rückwand jedes Ranges miteinbezogen und 8 zusätzliche Lautsprecher in einem Kreis um die Kuppeldecke hinzugefügt. Ein Paar an Subwoofern wurde über dem Proszenium installiert.

---

<sup>1</sup> B&K... Bruel und Kjaer

Die Decken LS und die LS an den Rängen wurden von separaten LARES Geräten angesteuert, damit jeder individuell beeinflusst werden konnte. Als Systemmikrofone dienten 2 Hypernierenmikrofone, die weit über dem Orchestergraben montiert wurden. Die zwei LS Subsysteme wurden dann so eingestellt, dass eine Welligkeit von  $\pm 1.5\text{dB}$  über die gesamte Halle erreicht wurde.

Da einerseits die meiste Information der Sänger in Frequenzen zwischen 700 und 4000Hz liegt und andererseits der größte Teil der Energie des Orchesters in den Grundtönen liegt (unter 500Hz), ist es möglich das 'envelopment' für das Orchester ohne eine Beeinflussung der Sänger zu verbessern. Das System wurde daher frequenzabhängig gestaltet, wobei der Hallpegel über 500 Hz um 6dB abgesenkt wurde. Dies führte zu einer Nachhallzeit von 1.7 Sekunden bei 500 Hz. Als das System 1997 schließlich dauerhaft installiert wurde, wurden einige der LS auf den Rängen durch Lautsprecher mit nierenförmiger Charakteristik über den Türrahmen ersetzt, was die in Kapitel 5.1 beschriebenen Probleme mit dem Direktschall der Lautsprecher löste. 2 unabhängige Subwoofer wurden auf entgegengesetzten Seiten der Kuppeldecke installiert. Die Nachhallzeit kann in der nun vorliegenden Version bis zu 2 Sekunden verlängert werden.

## 5.4 VRAS - Variable Room Acoustics System

### 5.4.1 Einleitung

Poletti bezeichnet sein System als neues 'non in line' System, das die Probleme der herkömmlichen 'non in line' Systeme löst [Poletti, 4]. Es basiert auf seinen früheren Entwicklungen [Poletti, 1], erweitert diese jedoch um eine 'in-line' Komponente, wodurch das System genaugenommen ein Hybrid System ist. Das System realisiert eine elektroakustische Variante eines gekoppelten Raumes (im Folgenden als „Sekundärer Raum“ bezeichnet), die eine von der Lautheit unabhängige Erhöhung des Hallpegel ermöglicht.

Das System besteht aus einer Anzahl unabhängiger Breitband Mikrofone und Lautsprecher, wie bei dem Mehrkanal Hall System (MCR siehe 4.4.2). Die Mikrofone mit kugelförmiger Richtcharakteristik werden in Raum verteilt, um diffusen Schall zu detektieren. Auch die Lautsprecher sind idealerweise Kugelstrahler. Die Mikrofonsignale werden in einer

Mehrkanalmatrix zusammengefasst und verhallt bevor sie zu den Lautsprechern gesendet werden. Dies bringt folgende Vorteile mit sich:

1. Die Nachhallzeit des Raumes kann erhöht werden, indem die Nachhallzeit des Halles erhöht wird. Dabei bleibt die Schleifenverstärkung konstant, wodurch hohe Hallverstärkungen bereits bei niedrigen Schleifenverstärkungen möglich sind. Dies verhindert Klangverfärbungen, die bei dem MCR System bei hohen Verstärkungen auftreten. Des Weiteren ist die Lautheit von der Veränderung des Nachhalles unabhängig.
2. Die Summation der Mikrofonsignale verbessert die Diffusität im System. Ein Signal eines Mikrofons wird gedämpft und gleichmäßig an alle Lautsprecher geschickt. Dies ist nach [poletti, 4] die optimale Möglichkeit, um sowohl die Textur als auch die Diffusität des Raumhalles zu erhöhen. Allerdings darf kein Signal des Systems vor dem Direktschall die Zuhörerplätze erreichen.

Der verwendete Hall vollzieht eine gleichmäßige Verstärkung aller Frequenzen und reduziert daher das Risiko von Klangfarbenfärbungen und Instabilität. Mit Hilfe von Filtern kann die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit kontrolliert werden. Typischerweise wird die Nachhallzeit an jene des Raumes angepasst. Zusätzlich sind digitale Filter und Verzögerungsglieder implementiert.

#### 5.4.2 Der elektroakustisch gekoppelte Raum

Wie bereits erwähnt, ist das VRAS System das elektroakustische Äquivalent eines passiv gekoppelten Raumes, das eine Reihe von Vorteilen (freie Wahl der Raumgröße, keine Signalverluste etc.) mit sich bringt. Die Leistung des Systems hängt von den Nachhallzeiten des Raumes und des VRAS Halles sowie dem elektroakustischen Koppelkoeffizienten ab (dieser entspricht der mittleren Schleifenverstärkung des Systems).

Der Abfall des Raumklanges besteht aus 2 Komponenten, deren Amplituden und Nachhallzeiten vom Primärraum, dem VRAS Hall und der Schleifenverstärkung bestimmt werden. Falls die Schleifenverstärkung gering ist und die VRAS Nachhallzeit im Verhältnis

zu jenem des Primärtraumes hoch ist, kann ein doppelter Abfall auftreten (vgl. [poletti 1 u. 4]). Typischerweise wird das System außerhalb dieses Bereiches betrieben.

#### 5.4.3 Kontrolle von frühen Reflexionen

Da die Mikrofone hauptsächlich im Diffusfeld platziert werden, ist der detektierte Direktschall sehr gering. Dennoch produziert jeder Kanal eine direkte Komponente, deren Stärke vom Benutzer eingestellt werden kann. Daher kann das Verhältnis von Direktschall zu Hall in weiten Bereichen variiert werden. Wird ein höherer Direktschallanteil benötigt, können zusätzliche Mikrofone in der Nähe der Bühne positioniert werden. In der Matrix können diese Direktsignale zu bestimmten Lautsprecher - Untersystemen geschickt werden, während die Hallsignale allen Lautsprechern zugeteilt werden.

Falls erforderlich, kann ein separates VRAS Untersystem erstellt werden, dessen Matrix als reine Verzögerungsmatrix fungiert und frühe Reflexionen erzeugt. Die Signale stammen in diesem Fall aus einer Anzahl von Richtmikrofonen, die auf die Bühne ausgerichtet sind.

#### 5.4.4 Mittlere Verstärkungsanalyse eines allgemeinen 'Enhancement' Systems<sup>1</sup>

Es wird für die folgenden Überlegungen eine statistische Beschreibung der Raumübertragungsfunktionen angenommen, die über der Schröder Frequenz gültig ist. Für eine Anregung mit bandbegrenztem weißen Rauschen kann die durchschnittliche Ausgangsleistung einer Einkanalraumübertragungsfunktion angeschrieben werden als die mittlere Eingangsleistung normiert auf eine mittlere Leistungsverstärkung. Für kaskadierte Einkanalssysteme steigt die Varianz schnell mit der Anzahl der Kanäle. Die gemittelte Leistungsanalyse ist näherungsweise gültig für unabhängige kaskadierte Mehrkanalsysteme. Für kaskadierte Systeme trifft die Analyse nur dann zu, solange die Schleifenverstärkung gering ist.

---

<sup>1</sup> vgl. [poletti 1,3 u. 6]. 'Enhancement' System: System zur Verbesserung der Raumakustik.

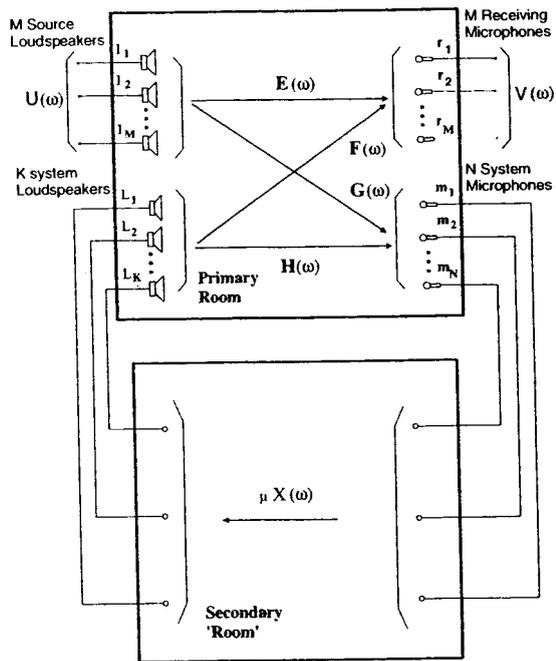


Abb. 5.3: Primärer und „Sekundärer“ Raum, vgl. [Poletti, 3]

Primärer Raum:

- Die akustischen Quellen sind die M Quelllautsprecher.
- Die Ausgänge des Systems entsprechen den M Empfängermikrofonen.

Das elektroakustische System zur Verbesserung der Raumakustik besteht aus:

- N Systemmikrofonen, die zur Detektion des Schallfeldes an verschiedenen Raumpositionen dienen,
- Einem Prozessor mit der Übertragungsfunktion  $X$ ,
- Der Schleifenverstärkung  $\mu$
- Und den K Systemlautsprechern.

Insgesamt gibt es 4 Übertragungsfunktionsmatrizen: E, F, G, H

Folgende Annahmen werden getroffen:

1. Die  $M$  Empfänger-mikrofone (=Zuhörer) sind im Diffusfeld der Quelllautsprecher positioniert.  
Die Leistungsverstärkung der Übertragungsfunktionsmatrix  $E$  ist  $M$ .
2. Die  $M$  Empfänger-mikrofone befinden sich im Diffusfeld der Systemlautsprecher  
Die Leistungsverstärkung der Übertragungsfunktionsmatrix  $F$  ist  $M$ .
3. Die  $N$  Systemmikrofone sind im Diffusfeld der Systemlautsprecher, damit die Stabilität des Systems gewährleistet ist.  
Die Leistungsverstärkung der Übertragungsfunktionsmatrix  $H$  ist  $N$ .
4. Die  $N$  Systemmikrofone können in beliebigem Abstand zu den Quelllautsprechern stehen.  
Ihre Position entscheidet, ob es sich um ein 'in line' oder 'non in line' System handelt.

Den Prozessor  $X$  kann man sich als zweiten Raum oder einen Mehrkanalhall vorstellen mit einer Leistungsverstärkung  $K$  (siehe Abb. 5.3).

#### 5.4.5 Leistungsverstärkung mit Einbezug der Mikrofonrichtung und des Abstands zur Quelle

##### 'In line' Systeme

Richtmikrofone 1. Ordnung werden oft dazu benützt, die Leistung des direkten Schallanteils relativ zur Leistung des halligen Anteils zu erhöhen. Die Empfindlichkeit eines solchen Mikrofons ist gegeben durch:

$$f(\mathbf{q}) = \mathbf{s} [\mathbf{b} + (1 - \mathbf{b}) \cos(\mathbf{q})] \quad \text{Gl. 5.4}$$

$\sigma$       Empfindlichkeit auf der Achse

$\theta$       Abweichungswinkel der Quelle von der Achse

REE ('random energy efficiency') gibt die Gesamtenergie an, die von einem Mikrofon 1. Ordnung relativ zu einem Kugelmikrofon detektiert wird.

$$REE = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} [\mathbf{b} + (1 - \mathbf{b}) \cos(\mathbf{q})]^2 \sin(\mathbf{q}) d\mathbf{q} = \mathbf{b}^2 + \frac{1}{3} (1 - \mathbf{b})^2 \quad \text{Gl. 5.5}$$

Bildet man den Reziprokwert von REE, so erhält man die Direktheit  $Q$ . Der minimale REE Wert wird für ein Hypernierenmikro erhalten (vgl. Tabelle 4.1).

Diffusempfindlichkeit: 
$$\mathbf{h} = \mathbf{s} \sqrt{REE} = \frac{\mathbf{s}}{\sqrt{Q}}$$

Empfindlichkeit auf der Achse 
$$\mathbf{s} = \sqrt{Q} \cdot \mathbf{h}$$

Die Empfindlichkeit eines Mikrofons als Funktion von  $\theta$  kann dann geschrieben werden als:

$$f(\mathbf{q}) = \sqrt{Q} \cdot \mathbf{h} [\mathbf{b} + (1 - \mathbf{b}) \cos(\mathbf{q})] \quad \text{Gl. 5.6}$$

Der Gewinn an Richtwirkung eines Richtmikrofons wird bestimmt, indem die Leistung in einem Abstand  $r$  zu akustischen Quelle (mit der Leistung  $W_{ac}$ ) berechnet wird. Der durchschnittliche quadratische Halldruck beträgt:

$$\tilde{p}^2 = rcI \quad (\text{siehe}^1)$$

Dies führt zu einer durchschnittlicher quadratischen Spannung:

$$\tilde{v}^2 = \mathbf{h}^2 rc \left[ Q \frac{W_{ac}}{4pr^2} + \frac{4W_{ac}}{A} \right] = \mathbf{h}^2 rc \frac{4W_{ac}}{A} \left[ \frac{A}{4 \cdot 4pr^2} Q + 1 \right] \quad \text{Gl. 5.7}$$

Mit dem Hallradius  $r_R = \sqrt{\frac{A}{16p}}$  ergibt sich für  $\tilde{v}^2$ :

---

<sup>1</sup> Für eine kugelförmige Schallquelle gilt für die Intensität:  $I = W \left[ \frac{1}{4pr^2} + \frac{4}{A} \right]$ . Der erste Term gibt den Direktschall an, der zweite den Hallanteil.  $A$  ist hier die gesamte Absorptionsfläche.

$$\tilde{v}^2 = (\mathbf{h}^2 \mathbf{r}c) \frac{4W_{ac}}{A} \left[ Q \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 + 1 \right] \quad \text{Gl. 5.8}$$

Vereinfachungen:

- Die akustischen Quellen werden durch elektroakustische ersetzt.
- Die Leistungsquellen sind M elektrische Quellen mit der gesamten Leistung  $W_{in}$ .
- Die Hallfeldübertragungsfunktionen haben Einheitsverstärkung.

Die Leistungsverstärkung von jedem der M Quelllautsprecher Eingängen zu jedem beliebigem Systemmikrofonausgang ist daher:

$$\left[ Q \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 + 1 \right] \quad \text{Gl. 5.9}$$

Für N Mikrofone im selben Abstand zur Quelle ergibt die gesamte Leistungsverstärkung N mal diesen Wert (Angenommen wird dabei, dass die Signale später inkohärent addiert werden - z.B. indem sie durch einen zweiten Raum oder Hall durchgeschliffen werden).

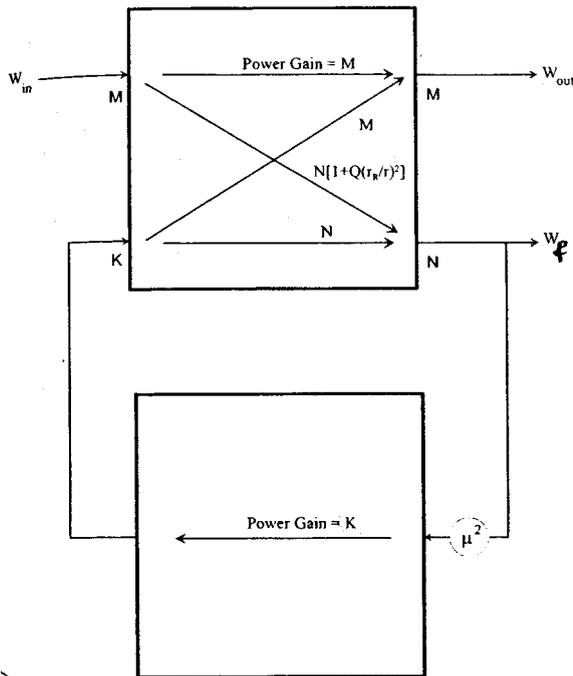


Abb. 6.4: Mittlere Leistungsanalyse, vgl. [Poletti, 3]

#### 5.4.6 Abweichung von der mittleren Leistungsverstärkung

Mittlere Leistung an den Systemmikrofonausgängen

$$W_f = N \left[ Q \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 + 1 \right] W_{in} + m^2 N K W_f \quad \text{Gl. 5.10}$$

$$W_f (1 - m^2 N K) = N \left[ Q \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 + 1 \right] W_{in}$$

$$W_f = \frac{N \left[ Q \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 + 1 \right]}{1 - m^2 N K} W_{in} \quad \text{Gl. 5.11}$$

Mittlere Leistung an den Empfängermikrofonen

$$W_{out} = MW_{in} + Mm^2KW_f$$

$$W_{out} = M \left[ \frac{1 + m^2NKQ \left( \frac{r_R}{r} \right)^2}{1 - m^2NK} \right] W_{in}$$

Verstärkung

$$\Gamma = \frac{1 + m^2NKQ \left( \frac{r_R}{r} \right)^2}{1 - m^2NK} \quad \text{Gl. 5.12}$$

Wobei gilt:  $\Gamma = \Gamma_i \Gamma_n$

$$\Gamma_i = 1 + m^2NKQ \left( \frac{r_R}{r} \right)^2 \quad \text{'in line' Leistungsverstärkung} \quad \text{Gl. 5.13}$$

$$\Gamma_n = \frac{1}{1 - m^2NK} \quad \text{'non in line' Leistungsverstärkung} \quad \text{Gl. 5.14}$$

In einem Hybridsystem werden L der N Systemmikrofone innerhalb des Hallradius positioniert, wobei diese Mikrofone eine Richtcharakteristik aufweisen. Die verbleibenden N-L Mikros (Kugelcharakteristik) werden im Diffusfeld aufgestellt (Diffusfeldkalibrierung: beide Mikrofontypen haben gleiche Diffusfeldempfindlichkeit)

Nimmt man gleiche Abstände von der Quelle zu den 'in line' -Mikrofonen an, so ergibt sich für die gesamte Leistungsverstärkung:

$$\Gamma = \frac{1 + m^2LKQ \left( \frac{r_R}{r} \right)^2}{1 - m^2NK} \quad \text{Gl. 5.15}$$

Ist  $K$  gleich  $N$  und der Direktschall vernachlässigbar, reduziert sich die Leistungsverstärkung zu

$$\Gamma = \frac{1}{1 - \mathbf{m}^2 N^2}$$

In der Praxis müssen unterschiedliche Bereiche der Bühne mikrofoniert werden, was zu unterschiedlichen Mikrofonabständen und Empfindlichkeiten für jede Quellposition  $r_\theta$  führt.

Ziel ist eine gleichmäßige ‘in line’ -Verstärkung über den gesamten Bereich der Quellpositionen.

$$\Gamma(r_q) = \left[ 1 + \mathbf{m}^2 K Q \sum_{l=1}^L [\mathbf{b} + (1 - \mathbf{b}) \cos(\mathbf{q}_l)]^2 \cdot \left( \frac{r_R}{r_l} \right)^2 \right] \cdot [1 - \mathbf{m}^2 N K]^{-1} \quad \text{Gl. 5.16}$$

Die maximal mögliche ‘in line’ Verstärkung resultiert, wenn alle Mikrofone auf die Quelle ausgerichtet sind.

Der nötige Abstand der Schallquellen zu den ‘in line’ Mikrofonen berechnet sich dann aus Gl. 5.12 und 5.14 mit

$$\mathbf{m}^2 L K = \frac{L}{N} \left( 1 - \frac{1}{\Gamma_n} \right) \text{ zu}$$

$$r^2 = r_R^2 \frac{L Q (\Gamma_n - 1)}{N \cdot \Gamma_n (\Gamma_i - 1)} \quad r = r_R \cdot \sqrt{\frac{L Q (\Gamma_n - 1)}{M \Gamma_n (\Gamma_i - 1)}} \quad \text{Gl. 5.17}$$

#### 5.4.7 Realisierungsbeispiel

Konzertsaal:  $V=22000\text{m}^3$

$T_N=1.5\text{s}$  (Nachhallzeit)

$N=K=60$  Kanal System

10 Hypernierenmikrofone in gleichen Abständen von der Quelle

'non in line' Verstärkung=1.5

'in line' Verstärkung=1.5

$$r_R = 0.057 \sqrt{\frac{V}{T_N}} = 0.057 \sqrt{\frac{22000}{1.5}} = 6.903\text{m}$$

$$r = r_R \cdot \sqrt{\frac{LQ(\Gamma_n - 1)}{M\Gamma_n(\Gamma_i - 1)}} = 6.9 \sqrt{\frac{10 \cdot 4 \cdot (1.5 - 1)}{60 \cdot 1.5 \cdot (1.5 - 1)}} = 4.6\text{m}$$

Werden 20 'in line' Mikrofone verwendet, vergrößert sich der nötige Abstand zu

$$r = 6.9 \sqrt{\frac{20 \cdot 4 \cdot (1.5 - 1)}{60 \cdot 1.5 \cdot (1.5 - 1)}} = 6.5\text{m}$$

Ist mehr als eine Schallquelle vorhanden, müssen die Richtmikrofone ein größeres Gebiet abdecken, was zu einer Reduktion der maximalen 'in line' Verstärkung führt.

## 6 Kompensation von frühen diskreten Raumreflexionen

---

Bei der Wiedergabe aufgenommener Signale kommt es zur Überlagerung des Aufnahme- und des Wiedergaberaumes. Durch Kompensation der ersten frühen diskreten Raumreflexionen des Wiedergaberaumes, die wesentlich zur Raumwahrnehmung beitragen (vgl. Kap. 2), kann dieser bei der Wiedergabe ausgeblendet werden. Der Einfluss des Wiedergaberaumes auf das zu reproduzierende Schallfeld wird hierbei durch eine inverse Filterung reduziert.

Ein Ansatz, der den Einfluss des Wiedergaberaumes eliminiert, findet sich in [Sontacchi, Höldrich]. Dieser Lösungsvorschlag verbindet die Vorteile des holophonen Ansatzes (Aufnahme) mit den Vorteilen des Ambisonicansatzes<sup>1</sup>. Die durch den Lautsprecher erzeugten Reflexionen werden als Quellen interpretiert. Durch die Kenntnis der Quellenpositionen und deren zeitlichem Auftreten ist es möglich, die dadurch verursachten Wellenfelder zu synthetisieren und phaseninvertiert mit dem originalen Feld zu superponieren. Dazu werden die Raumimpulsantworten zwischen jedem Lautsprecher und jedem Mikrofon des Aufnahmearrays gemessen. Aus diesen Raumimpulsantworten werden die 3-dimensionalen Raumimpulsantworten im Ambisonicformat berechnet. Deren reflektive Anteile können in der Dekodiermatrix entsprechend berücksichtigt werden, wodurch jedes Element der Dekodiermatrix als Filter wirkt, d.h. die störenden Einflüsse des Wiedergaberaumes können durch die Filterung mit Ambisonic kodierten Raumimpulsantworten kompensiert werden.

Die vorliegende Arbeit greift den holophonen Ansatz auf, der auf dem Hygens'schen Prinzip basiert<sup>2</sup>. Aus dem Hygens'schen Prinzip folgt, dass jedes Schallfeld durch eine Verteilung von sekundären Quellen reproduziert werden kann. Dieser Sachverhalt wird mathematisch durch das Kirchhoff-Helmholtz Integral beschrieben:

---

<sup>1</sup> Der Nachteil des Ambisonic Ansatzes liegt bei der Aufnahme, bei der das Schallfeld in einem Punkt mit Mikrofonen unterschiedlicher Richtcharakteristik aufgenommen wird. Die Kodierung für höhere Ordnungen ist sehr aufwendig, da Mikrofone mit den entsprechenden Richtcharakteristiken noch nicht verfügbar sind.

<sup>2</sup> Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Zentrum einer Störung betrachtet werden, die Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist. Überlagern sich diese Elementarwellen, so beschreiben sie in Summe die zeitlich fortschreitende Wellenfront. Das Schallfeld einer primären Schallquelle kann somit durch eine Summe von sekundären Quellen erzeugt werden.

$$P(\vec{r}_R) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left[ P(\vec{r}_S) \cdot \nabla_S G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) - G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) \cdot \nabla_S P(\vec{r}_S) \right] \cdot \vec{n} dS \quad \text{Gl. 6.1}$$

$$\text{mit } G(\vec{r}_R | \vec{r}_S) = \frac{e^{-jk|\vec{r}_R - \vec{r}_S|}}{|\vec{r}_R - \vec{r}_S|} + K \quad \text{Green'sche Funktion}$$

$\vec{r}_S$  bzw.  $\vec{r}_R$  sind jeweils Punkte auf der einhüllenden Oberfläche  $S$  bzw. Punkte im begrenzten Volumen.

Durch die Kenntnis des Drucks und des Druckgradienten normal zur begrenzenden Oberfläche eines quellenfreien Volumens kann das Schallfeld innerhalb des Volumens eindeutig beschrieben werden. Bei der Aufnahme wird das Schallfeld entlang eines beliebigen Volumens durch ein Mikrofonarray aufgenommen, wobei die Größe des eingeschlossenen Volumens im wesentlichen von der Anzahl der verwendeten Mikrofone abhängig ist, da der Abstand zwischen den Mikrofonen nicht beliebig groß gemacht werden darf, damit räumliches Aliasing vermieden wird.

#### Konzept eines neuen Ansatzes

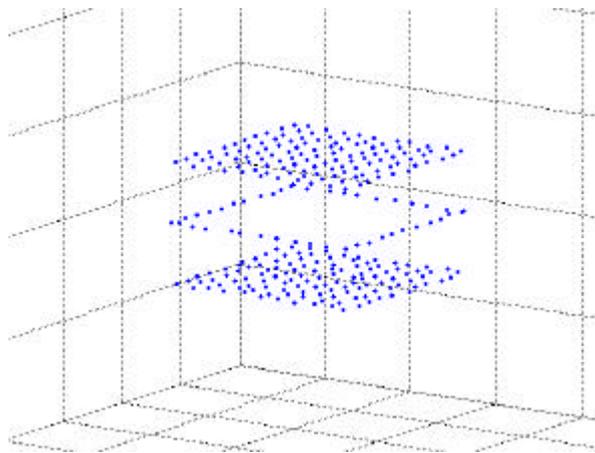
Durch die geeignete Positionierung von Mikrofonen (diese werden im Folgenden als Sensoren bezeichnet) wird nach dem holophonen Ansatz ein Rauggitter definiert. Zuerst erfolgt die Messung der Übertragungsfunktionen bzw. Impulsantworten zwischen jedem Lautsprecher und jeder Sensorposition. Diese Übertragungsfunktionen werden mathematisch durch eine Übertragungsmatrix beschrieben. Aus den gesuchten Direktsignalanteilen wird ein Zielvektor gebildet. Zielvektor, Übertragungsmatrix und gesuchte Filter bilden ein Normalgleichungssystem, das durch Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers gelöst wird. Betrachtet man die Kompensation eines Lautsprechersignals, so wirkt dieser Lautsprecher als Quelle, die anderen als Kompensationslautsprecher. Diese Kompensationslautsprecher erhalten das Signal des Quelllautsprechers, das mit den berechneten Filtern gefiltert wird. Dadurch wird zumindest an den Sensorpunkten ein Kompensationssignal erzeugt, das zu den frühen Reflexionen invers ist und sich dadurch mit diesen (beinahe) auslöscht. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass das Verhältnis von

Quell- zu Kompensationssignal separat eingestellt werden kann, die Filterung also je nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden kann.

### 6.1 Simulation mit dem RAK Programm

Erste Versuche zur Kompensation der frühen Reflexionen wurden mittels des Raumakustiksimulationsprogramms simuliert. Dadurch kann man ohne Messung realer Impulsantworten relativ rasch unterschiedliche Raumgitter (Volumina) testen.

Für das erste gewählte Raumgitter werden 286 Sensoren an der Oberfläche eines Quaders angeordnet (siehe Abb. 6.1). Jeder Sensor ist dabei mit einem leichten Jitter versehen, um den Einfluss von Eigenmoden zu vermeiden. Der Abstand zwischen den Mikrofonen darf nicht zu groß werden, damit räumliches Aliasing verhindert wird. Bei der vorliegenden Anordnung ist ein Abstand von ca. 20cm gewählt. Für das Raumgitter 1 ergibt sich eine filterbare Grundfläche von  $4\text{m}^2$ .



**Abb. 6.1: Raumgitter 1**

Bei der Berechnung mit den simulierten Impulsantworten zeigte sich bald, dass eine so hohe Anzahl an Sensoren in Hinblick auf Rechenzeit und Speicheraufwand kaum realisierbar sein dürfte. Nebenbei ergäben sich bei 286 Sensoren und 24 Lautsprechern 6864 Impulsantworten, die kaum ohne vollautomatisierte Messung gemessen werden könnten. Daher wurde eine neue Mikrofonanordnung gewählt (Raumgitter 2), die eine minimale Sensorzahl zum Ziel hatte. Diese ist in Abb. 6.2 zu sehen, die genauen Mikrofonkoordinaten kann man dem Anhang

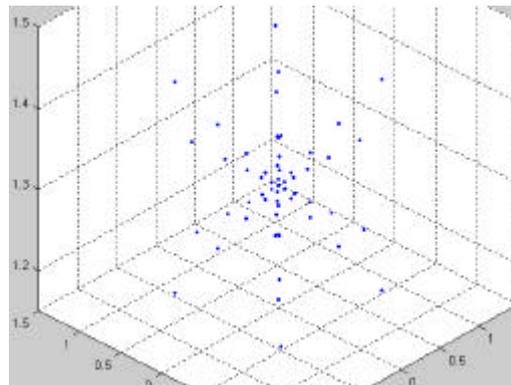
entnehmen. Aus dem größten Abstand zwischen den Sensoren folgt die untere Grenzfrequenz:

$$f_{ug} = \frac{c}{2I} = \frac{340}{2 \cdot 1.4} = 121 \text{ Hz}^1 \quad \text{Gl. 6.2a}$$

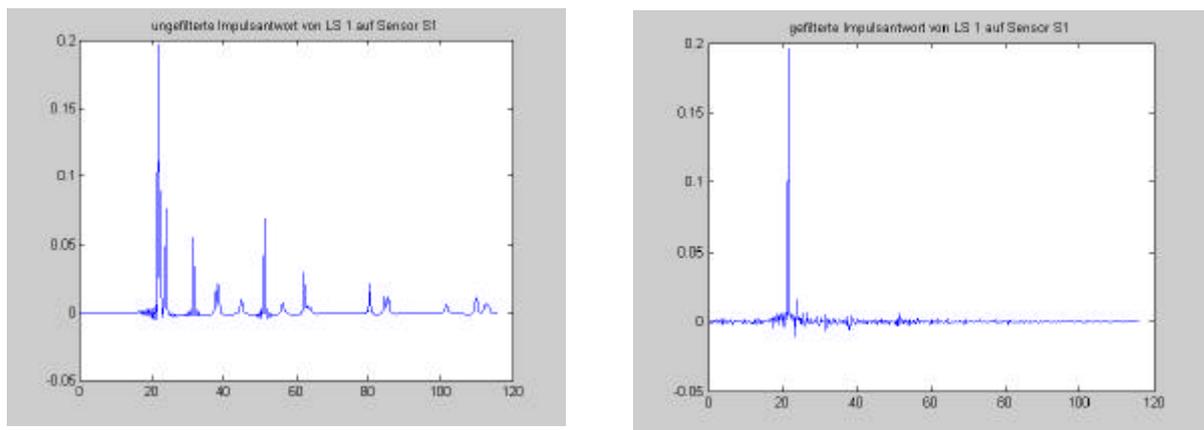
Aus dem kleinsten Abstand zwischen den Sensoren folgt die obere Grenzfrequenz:

$$f_{og} = \frac{c}{2I} = \frac{340}{2 \cdot 0.08} = 2125 \text{ Hz} , \quad \text{Gl. 6.2b}$$

d.h. es können Frequenzen maximal von ca. 121Hz bis ca. 2100 Hz kompensiert werden. Der eingeschränkte Frequenzbereich ermöglicht eine Reduktion der Abtastrate (siehe Seite 92). Abb. 6.3 zeigt eine simulierte ungefilterte und gefilterte Impulsantwort. Die Filterberechnung wird in Punkt 6.3 beschrieben.



**Abb. 6.2: Raumgitter 2**



**Abb. 6.3: Simulierte ungefilterte und gefilterte Impulsantwort**

<sup>1</sup> Um die untere Grenzfrequenz herabzusetzen, sollte für zukünftige Filterberechnungen ein Sensorarray mit einer größeren räumlichen Ausdehnung herangezogen werden.

## 6.2 Bestimmen der Impulsantworten

### 6.2.1 Ausmessen der Raumsamplepunkte (Positionieren der Sensoren)

Jeder Sensor wird mit Hilfe eines Entfernungsmesslasers<sup>1</sup> in den berechneten Raumkoordinaten (siehe Anhang) positioniert. Dazu wird der auf einem Stativ befestigte Laser in einem fixen Abstand von 2m zum Ursprung auf einer Koordinatenachse (bzw. Diagonale) aufgestellt, die zuvor am Boden mit Klebestreifen markiert wurde. Die Entfernung jedes Sensors zum Laser wird je nach Position vergrößert bzw. verkleinert. Die Höhe des Sensors wird mit einem Maßband gemessen. Wenn man berücksichtigt, dass der Laser einen maximalen Messfehler von 5mm produziert, und das Stativ, auf dem der Laser befestigt ist, zusätzliche Abweichungen verursacht, so kann man davon ausgehen, dass jeder Sensor durchschnittlich um +/-10mm von seiner berechneten Position abweicht. Diese Abweichung ist für die Filterberechnung ohne Bedeutung.



**Abb. 6.4: Musikseminarraum. Der Bereich, in dem die Stühle positioniert sind, soll gefiltert werden.**



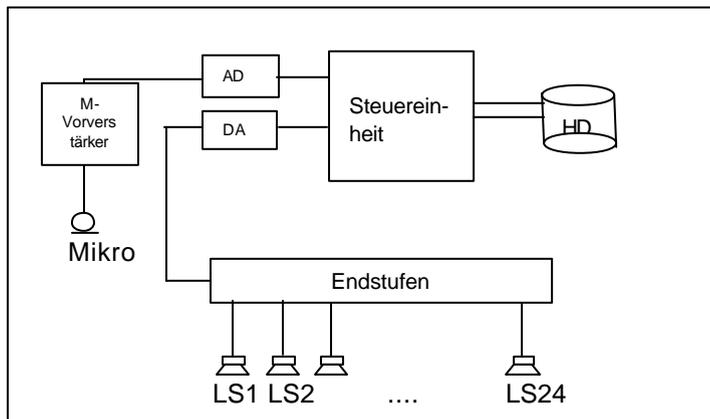
**Abb. 6.5: Messlaser, Mikrofon und ein Lautsprecher**

---

<sup>1</sup> technische Daten Laser: Strahldivergenz 0.16x0.6mrad; Impulsdauer  $15 \times 10^{-9}$  ms;  $\lambda = 635$  nm; typ. Messfehler: +/-3mm

### 6.2.2 Messung der Impulsantworten

Die Messung der Impulsantworten erfolgt durch Anregung mit einer Maximallängenfolge (kurz: MLS), wobei die MLS länger als die zu messende Raumimpulsantwort sein muss. Da für die praktische Implementierung die maximale Nachhallzeit 0.7s beträgt, wird eine 16 Bit MLS Folge gewählt. Die Dauer dieser Folge beträgt bei einer Abtastrate von 44.1kHz ca. 1.48s. Nun werden die D/A konvertierten MLS<sup>1</sup> mit der Dauer von ca. 14.9s nach der Reihe über alle Lautsprecher abgespielt, wobei die Steuerung durch eine Meßpatch erfolgt, der mittels pd<sup>2</sup> programmiert wurde. Zwischen dem Wechsel zu einem neuen Lautsprecher wird eine Pause von 3s berücksichtigt, damit der Raum ausschwingen kann. Über den Sensor wird die abgespielte MLS nach erfolgter A/D Konvertierung am PC auf einer Hard Disk (HD) als 'wav-file' aufgezeichnet.



**Blockschaltbild 6.1: Messaufbau zur Messung der Impulsantworten**

Vor der Messung muss das System kalibriert werden, d.h. für jeden Lautsprecher erfolgt ein Abgleich für die Laufzeit und die Verstärkung. Dadurch befinden sich nach Berücksichtigung der Laufzeiten und der Verstärkungsfaktoren alle Lautsprecher auf einer virtuellen Kugeloberfläche.

<sup>1</sup> Es werden mehrere MLS Folgen aneinandergereiht. Die ersten 2 MLS Folgen werden bei der späteren Verarbeitung nicht berücksichtigt, da diese zum Einschwingen des Raumes dienen. Über die verbleibenden MLS Folgen wird gemittelt.

<sup>2</sup> pd...pure data: Ist ein Programm zur Echtzeitaudioverarbeitung, das von Miller Puckette entwickelt wurde. Das IEM ist an der Weiterentwicklung maßgeblich beteiligt.

Während der Messung sollte die Temperatur konstant bleiben, da die Schallgeschwindigkeit pro Grad Temperaturänderung um 0.6m/s steigt.

$$c = 331m/s + 0.6t$$

t...Temperatur in Grad Celsius

### 6.2.3 Berechnung der Impulsantworten

Aus den aufgenommenen MLS Folgen berechnet sich die Impulsantwort wie folgt:

$$h_{i,j}(t) = DFT^{-1} \left\{ \frac{S_{i,j}(f) \cdot MLS(f)^*}{|MLS(f)|^2} \right\} = DFT^{-1} \{ S_{i,j}(f) \cdot MLS(f)^* \} \quad \text{Gl. 6.3}$$

mit  $MLS(f)$  als Diskrete Fourier Transformierte der MLS-Folge und  $S_{i,j}(f)$  die transformierte des  $i$ -ten Sensorsignals, wenn der  $j$ -te Lautsprecher angeregt wurde.

Für die folgenden Berechnungen muss die Latenzzeit der digitalen Soundkarte (RME Hammerfall) und der AD bzw. DA Konverter abgezogen werden.<sup>1</sup> Die verbleibenden Samples bis zum Direktschall entsprechen nun der Laufzeit vom Lautsprecher zum Sensor.

---

<sup>1</sup> Zur Latenzzeitbestimmung wurde ein Deltaimpuls über die gleichen Signalwege geschickt, die bei der Messung aufgetreten sind, nur wurde in diesem Fall das Signal vor den Lautsprechern (also nach den Limitern) wieder AD konvertiert und anstelle des Mikrofonsignals parallel zum Deltaimpuls aufgezeichnet. Mit Hilfe einer Kreuzkorrelation wurde die Verschiebung des Peaks bestimmt und eine Latenzzeit von 8501 Samples festgestellt (Audiobuffer und A/D bzw. D/A Wandler).

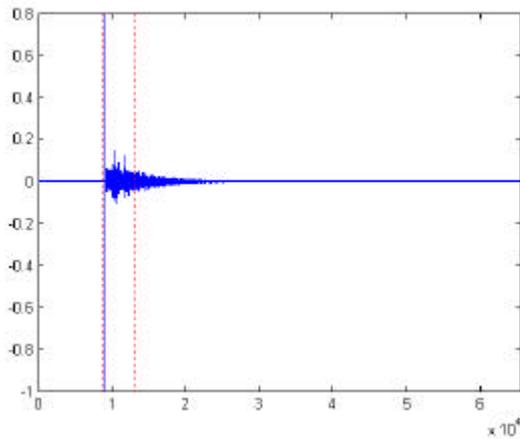


Abb. 6.6: Beispiel einer Impulsantwort, die aus der MLS berechnet wurde.

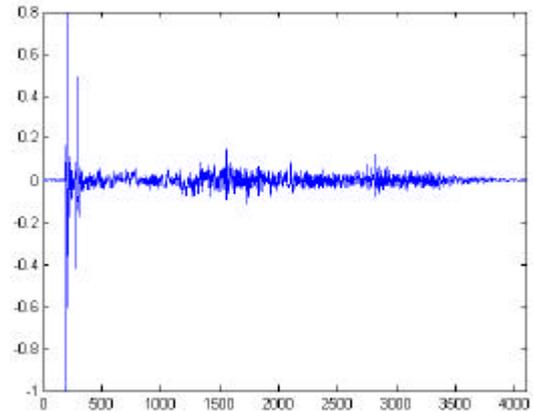


Abb. 6.7: Abzug der Latenzzeit, Verkürzen der Länge auf 4096 Punkte und Ausfaden. Diese Abb. entspricht dem rot markierten Bereich aus Abb. 6.6

### 6.3 Filterberechnung

Ziel der inversen Filterung ist eine Kompensation der frühen diskreten Reflexionen, da diese den Raumeindruck dominieren. Aus diesem Grund werden die Impulsantworten auf  $N = 4096$  Punkte (dies entspricht ca. 93ms) verkürzt. Um Unstetigkeitsstellen zu vermeiden, werden die letzten 1024 Punkte linear ausgeblendet (siehe Abb. 6.7).

$$\tilde{h}_{i,j}(n) = h_{i,j}(m) \cdot w(n) \quad \text{Gl. 6.4}$$

$$\text{mit } w(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n < \frac{3N}{4} \\ \frac{4}{N-4}(N-1-n) & \text{für } \frac{3N}{4} \leq n < N \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

### 6.3.1 Lösung im Frequenzbereich

Die Berechnung der gesuchten Filter erfolgt durch Lösen der Normalgleichungen.

$$Y = \underline{\underline{A}} \cdot X \quad \text{Gl. 6.5}$$

wobei  $X...$  gesuchte Filter im Frequenzbereich  
 $A...$  Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich  
 $Y...$  Zielfunktionen (Sensorsignale) im Frequenzbereich

Mit  $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_I]^T$  und  $Y_1 = [y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,I}]^T$  etc.

und  $X = [X_1, X_2, \dots, X_J]^T$  und  $X_1 = [x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,J}]^T$  etc.

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A \end{bmatrix}$$

Die Matrix  $A$  beinhaltet die Übertragungsfunktionen zwischen den  $I$  Sensoren und den  $J$  Lautsprechern, die aus den Impulsantworten mit der Diskreten Fourier Transformation berechnet wurden.

$$A_{i,j}(f) = DFT_{2N} \left\{ \tilde{h}_{i,j}(n) \right\} \quad (\text{siehe}^1) \quad \text{Gl. 6.6}$$

$A_{i,j}$  repräsentiert hierbei die Übertragungsfunktion zwischen dem  $j$ -ten Lautsprecher und dem  $i$ -ten Sensor<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Der Subskript bedeutet, dass eine  $2N$  Punkte DFT durchgeführt wird (Verhinderung einer zirkulären Faltung).

<sup>2</sup> Im Folgenden wird die Frequenzabhängigkeit der einzelnen Größen nicht explizit gekennzeichnet, außer es besteht eine dringende Notwendigkeit.

$$A(f) = \begin{bmatrix} \text{diag}(A_{1,1}(f)) & \text{diag}(A_{2,1}(f)) & \cdots & \text{diag}(A_{J,1}(f)) \\ \text{diag}(A_{1,2}(f)) & & & \vdots \\ \vdots & & & \\ \text{diag}(A_{1,I}(f)) & \cdots & & \text{diag}(A_{J,I}(f)) \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6.7}$$

wobei

$$\text{diag}(A_{i,j}) = \begin{bmatrix} A_{i,j}(f_1) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{i,j}(f_2) & 0 & & \\ 0 & 0 & A_{i,j}(f_3) & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & A_{i,j}(f_{2N}) \end{bmatrix}$$

Der Vektor  $X$  aus Gl. 6.5 beinhaltet die gesuchten Filtersets zur Kompensation der einzelnen Lautsprecher. Mit dem Vektor  $Y$  können die gewünschten Direktschall Anteile an den  $I$  Sensoren für alle  $J$  Lautsprecher vorgegeben werden. Diese werden im folgenden als Zielfunktionen bezeichnet. Die Sensoranzahl  $I$  wird größer als die Anzahl der gesuchten Filter  $J$  gewählt, um ein überbestimmtes Gleichungssystem zu erhalten. Dadurch ist die Lösung des Systems eindeutig.

Aus Gründen der Komplexität wird nun die Bestimmung der Filter bzw. die Lösung des Gleichungssystems anhand eines Lautsprechers (LS1) exemplarisch hergeleitet.

$$Y_1 = A \cdot X_1 \quad \text{Gl. 6.8}$$

Die Lösung der Normalgleichung erhält man durch Minimierung des quadratischen Fehlers.  
Fehler

$$r = A \cdot X_1 - Y_1 \quad \text{wobei, } r \neq 0$$

$X_1$  muss nun so bestimmt werden, dass die Fehlerquadratsumme minimal wird.

$$\sum_{i=1}^m r_i^2 = r^H \cdot r = (A \cdot X_1 - Y_1)^H \cdot (A \cdot X_1 - Y_1) = \text{Min} \quad (\text{siehe}^1) \quad \text{Gl. 6.9}$$

Der Vektor X ist genau dann eine Lösung von Gl. 6.7 wenn der Restvektor orthogonal zu allen Spalten von A ist.

$$A^H \cdot r = A^H \cdot (A \cdot X_1 - Y_1) = 0 \quad \text{Gl. 6.10}$$

Da die Matrix A nicht quadratisch geartet ist, muss ihre Pseudoinverse gebildet werden.

$$X_1 = (A^H \cdot A)^{-1} \cdot A^H \cdot Y_1 \quad \text{Gl. 6.11}$$

Bei der obigen Lösung erhält man für alle Lautsprecher ein Filterset, d.h. auch der Lautsprecher 1 wird zur Kompensation herangezogen. Das gewünschte Signal ergibt sich in diesem Fall durch die akustische Überlagerung im Raum in einem definierten Bereich, bzw. zumindest an den Sensorpunkten. Da sich das gewünschte Signal bei dieser Berechnung nur aus gefilterten Signalen zusammensetzt, ist die Wahrscheinlichkeit einer Klangfarbenfärbung groß. Eine Verbesserung wird erreicht, wenn der selektierte Lautsprecher nicht zu seiner eigenen Kompensation beiträgt. Dadurch wird auch der Anteil der Kompensierung regelbar. Die Zielfunktionen müssen für diesen Lösungsansatz entsprechend modifiziert werden.

$$Y_1 - x_1 \cdot A_1 = A_2 \cdot x_2 \quad \text{Gl. 6.12}$$

$$\text{mit } A_2 = \begin{bmatrix} A_{2,1} & A_{3,1} & \cdots & A_{J,1} \\ A_{2,2} & A_{3,2} & & A_{J,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{2,I} & A_{3,I} & \cdots & A_{J,I} \end{bmatrix}$$

$$\text{und } x_1 = x_{1,1}(f) = DFT_{2N} \{ \text{hanning}(n) \otimes \mathbf{d}(n-N) \} \quad (\text{siehe}^2) \quad \text{Gl. 6.13}$$

$$x_2 = [x_{1,2}(f), x_{1,3}(f), \dots, x_{1,J}(f)]^T$$

---

<sup>1</sup> H...hermitesch. Bezeichnet die konjugiert Transponierte.

<sup>2</sup>  $\otimes$  ...bezeichnet die Faltung

Das Hanning Fenster wird so gewählt, dass das Eingangssignal nur den zur Filterung relevanten Frequenzbereich enthält (bis max. 2100 Hz siehe nächste Seite). Die modifizierten Zielfunktionen ergeben sich, wenn man vom gewünschten Direktschallanteil die tiefpassgefilterte Impulsantwort abzieht. Gl. 6.14 beschreibt daher die inversen Reflexionen.

$$\tilde{Y}_1 = Y_1 - x_1 \cdot A_1 \quad \text{Gl. 6.14}$$

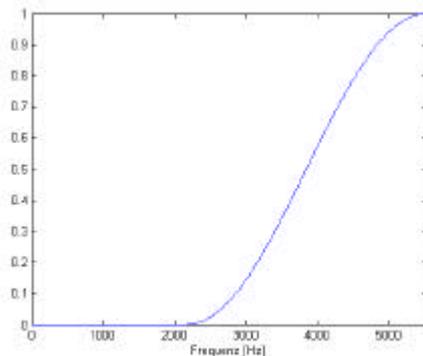
Die Matrix  $A$  muss mit einem Regularisierungsparameter  $\mathbf{a}$  konditioniert werden. Damit ergibt sich für die Lösung des Systems bzw. für das Filterset  $x_2$  zur Kompensation der ersten frühen Reflexionen:

$$x_2 = (A_2^H \cdot A_2 + \mathbf{a} \cdot E)^{-1} \cdot A_2^H \cdot \tilde{Y}_1 \quad \text{Gl. 6.15a}$$

wobei  $E$  die Einheitsmatrix bezeichnet.

Der Regularisierungsparameter  $\mathbf{a}$  gewährleistet eine Lösung unter Berücksichtigung einer endlichen Energieverteilung. Der Regularisierungsparameter ist frequenzabhängig zu gestalten (siehe Abb. 6.8).

$$x_2 = (A_2^H \cdot A_2 + \mathbf{a}(f) \cdot E)^{-1} \cdot A_2^H \cdot \tilde{Y}_1 \quad \text{Gl. 6.15b}$$



**Abb. 6.8: frequenzabhängiger Verlauf des Regularisierungsparameter**

### Generierung des Zielimpulses

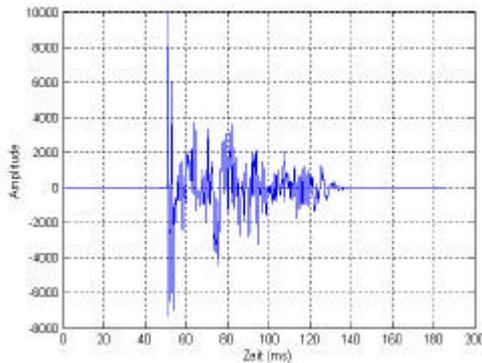
Betrachtet man die tiefpassgefilterte Impulsantwort von Lautsprecher 1 im Zeitbereich, so zeigt sich, dass sich der Direktschall aus einem positiven und einem negativen Maximum (= größtes Minimum) zusammensetzt. Mit dem nächsten lokalen Maximum ist der Impuls quasi zu Ende.

Die modifizierte Lösung (siehe Gl. 6.12) macht eine Generierung eines expliziten Direktschallanteils überflüssig, da die Zielfunktionen hier den invertierten Reflexionen entsprechen. Es genügt also das Ende des Direktschalls zu detektieren, das mit dem oben beschriebenen lokalen Maximum erreicht ist. Die gemessenen Impulsantworten weisen allerdings eine sehr frühe Reflexion mit hoher Amplitude auf (Bodenreflexion), die innerhalb der ersten 2-3ms auf den Direktschall folgt. Diese Reflexion kann praktisch nicht kompensiert werden, da für diese Richtung keine Kompensationslautsprecher vorhanden sind. Daher beschränkt man sich auf eine Kompensation der Reflexionen, die nach dem Direktschall und nach der ersten Reflexion (Bodenreflexion) erfolgen. Die negativen Reflexionen werden nun erzeugt, indem das Maximum der Impulsantwort und der dazugehörige Zeitpunkt detektiert wird und die Impulsantwort bis zu dem Zeitpunkt, der die Bodenreflexion einschließt, Null gesetzt wird. Der Bereich danach wird linear eingeblendet (siehe Gl. 6.4) und anschließend invertiert.

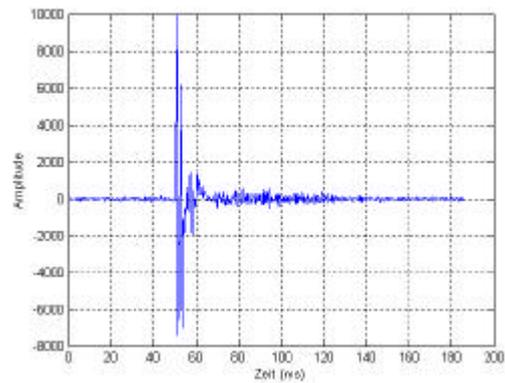
Wie in Punkt 6.1 gezeigt wurde, können Frequenzen maximal bis 2100Hz kompensiert werden. Es liegt daher nahe, die Abtastrate der gemessenen Impulsantworten von 44100 Hz um den Faktor 10 zu reduzieren. Da die praktische Implementierung mit pd erfolgt (siehe Realisierung 6.4) und hier Abtastratenreduktionen nur mit Vielfachen von 2 durchgeführt werden können, wird eine Reduktion um den Faktor 8 gewählt, was eine Abtastrate von 5512.5 Hz ergibt. Die Abtastratenreduktion kann im Zeitbereich oder im Frequenzbereich erfolgen. Werden die ersten 512 Punkte der 8192 Punkte langen Frequenzantwort genommen, entspricht dies einer Abtastratenreduktion im Frequenzbereich um den Faktor 8. Aus recheneffizienten Gründen wird die Filterberechnung nun mit 512 Punkten durchgeführt. Vor der Transformation in den Zeitbereich wird das Spektrum der berechneten Filter noch um den konjugiert komplexen Anteil ergänzt.

$$x(f) = x^*(-f)$$

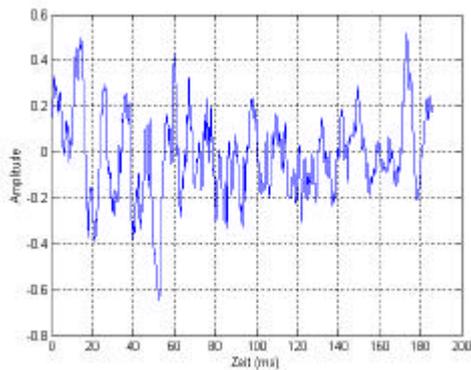
Ergebnisse der Filterberechnungen im Frequenzbereich



**Abb. 6.9: Ungefilterte Impulsantwort eines Sensors**



**Abb. 6.10: Gefilterte Impulsantwort eines Sensors**



**Abb. 6.11: Ein Filter im Zeitbereich**

Die Energie der Reflexionen kann durch die Filterung um den Faktor 16 reduziert werden. Dies entspricht einer Absenkung um ca. 12dB.

Die Berechnung der Filter im Frequenzbereich liefert ein Filterset mit 1024 Koeffizienten im Zeitbereich. Soll das Eingangssignal nun mit diesen Filtern gefaltet werden (= Multiplikation im Frequenzbereich), so bedingt dies eine FFT Länge von  $2N=2048$  (siehe 6.4).



$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,J} \\ \vdots & A_{i,j} & \vdots \\ A_{I,1} & \cdots & A_{I,J} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6.18}$$

Alle Filter  $x_{j,t}$  werden in der Matrix X zusammengefasst.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,T} \\ \vdots & x_{j,t} & \vdots \\ x_{J,1} & \cdots & x_{J,T} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6.19}$$

Dabei ist jedes Filter  $x_{j,t}$  ein Spaltenvektor.

$$x_{j,t} = \begin{bmatrix} x_{i,j}(0) \\ x_{i,j}(1) \\ \vdots \\ x_{i,j}(N_x - 1) \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 6.20}$$

$N_x$  ist die Anzahl der Filterkoeffizienten von  $x_{j,t}(n)$ .

Aus Gründen der Komplexität werden nun die Filter zur Kompensation eines Lautsprecher Signals gelöst. Dazu wird der entsprechende t-te Spaltenvektor aus X herausgegriffen und mit der Übertragungsmatrix A multipliziert.

$$y_t = \begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \\ \vdots \\ y_{Jt} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x_{1t} \\ x_{2t} \\ \vdots \\ x_{Jt} \end{bmatrix} = A \cdot x_t \quad \text{Gl. 6.21}$$

Aus der Differenz des gesuchten Vektors und des tatsächlichen Kompensationsvektors ergibt sich ein Fehlervektor e.

$$e_t = d_t - w_t \quad \text{Gl. 6.22a}$$

eingesetzt ergibt dies:

$$e_t = d_t - A \cdot x_t \quad \text{Gl. 6.22b}$$

mit  $e_t = \begin{bmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \\ e_{3t} \end{bmatrix}$ ,  $d_t = \begin{bmatrix} d_{1t} \\ d_{2t} \\ d_{3t} \end{bmatrix}$

Jede Faltungsmatrix in  $A$  hat  $N_x$  Spalten.

Zur Minimierung des quadratischen Fehlers wird die Kostenfunktion aufgestellt.

$$J = e_t^T e_t + \mathbf{b} \cdot x_t^T x_t \quad \text{Gl. 6.23}$$

$\mathbf{b}$  ...Regularisierungsparameter

Diese wird minimal, wenn  $x_t$  so gewählt wird, dass gilt:

$$x_t = [A^T A + \mathbf{b}E]^{-1} \cdot A^T d_t \quad \text{Gl. 6.24}$$

Für das gewählte Sensorarray mit 53 Sensoren und den 24 Lautsprechern ist die Matrix  $A$  für die direkt Berechnung der Inversen so groß, dass sie mit herkömmlichen PC's nicht berechnet werden kann. Aus diesem Grund wird ein Lösungsansatz gewählt, bei dem ein explizites Aufstellen der Matrix  $A$  vermieden wird. Dies kann durch einen adaptiven Algorithmus erreicht werden.

## 6.4 Adaptive Lösung

Die gesuchten Filter werden bei dieser Lösungsmethode mit Hilfe eines Regelkreises bestimmt. Als Eingangssignal wird weißes Rauschen angenommen. Nach jedem Adaptionsschritt wird ein neues Filterset berechnet. Das Eingangssignal wird im nächsten Adaptionsschritt unter Berücksichtigung der Übertragungspfade mit diesem Filterset gefaltet. Von diesem Signal werden die Zielfunktionen (= negative frühe Reflexionen) abgezogen. Dies ergibt einen Fehlervektor  $e$ , mit dem wiederum ein neues Filterset berechnet wird.

Das System besteht aus  $J$  Kompensationslautsprechern, die als Kontrollfilter bezeichnet werden. Die Übertragungspfade werden durch die  $S$  Sensoren<sup>1</sup> repräsentiert, die als  $S$  Fehlersensoren wirken. Mit Hilfe der Filterung soll an den Sensoren ein Signal erzeugt werden, das den negativen Erstreflexionen entspricht, die mit dem Eingangssignal gefaltet wurden. Ein 'processing delay' berücksichtigt eine Korrektur der Verarbeitungszeit. Das Ergebnis der Filterung ist also das erwünschte Signal (desired). Das mit den Übertragungspfaden beaufschlagte Eingangssignal wird als gefiltertes Referenzsignal  $R(n)$  bezeichnet.  $A$  beinhaltet die Impulsantworten aller  $J$  Lautsprecher auf alle  $S$  Sensoren.  $hd$  bezeichnet die eingeblendeten Reflexionen der Impulsantworten von Lautsprecher 1 auf alle  $S$  Sensoren. Auch hier wird nur die Kompensation eines Lautsprechers betrachtet. Die Konvergenzzeit ist abhängig von den Eigenwerten der Autokorrelationsmatrix des gefilterten Referenzsignals. Im Folgenden sei der Berechnungsweg überblicksmäßig dargestellt.

### Berechnungsweg

$x$	Eingangssignal <sup>1</sup>
$w$	gesuchte Filter
$n...$	Zeitpunkte
$t$ ...	processing Delay
$S...$	Sensornzahl (53)
$J...$	Anzahl der Kompensationslautsprecher (23)

---

<sup>1</sup> Die Sensoren werden hier mit  $S$  bezeichnet, um die unterschiedlichen Indizes besser unterscheiden zu können.

- A... Matrix aller Impulsantworten  
hd... Vektor mit den eingeblendeten Reflexionen  
K... Länge der Zielfunktionen d (512 Punkte)  
L... Länge der Impulsantworten C (512 Punkte)

### 1. Erzeugen von Weißem Rauschen mit bestimmter Länge

$$x(n) = WR(n) \quad \text{Gl. 6.25}$$

### 2. Berechnen der gewünschten Zielfunktionen

$$d_s(n) = - \sum_{k=0}^{511} h d_s(k) \cdot x(n-k-t) \quad \text{Gl. 6.26}$$

Die Zielfunktionen an den Sensoren berechnen sich aus den inversen Reflexionen, die mit dem Eingangssignal gefaltet werden.

### 3. Filtern des Eingangssignal mit den Filtern

$$y_j(n) = \sum_{k=0}^{511} w_{j,k} \cdot x(n-k) \quad \text{Gl. 6.27}$$

### 4. Fehlerberechnung

$$e_s(n) = d_s(n) - \sum_{j=1}^{23} \sum_{l=0}^{511} A_{s,j,l} \cdot y_j(n-l) \quad \text{Gl. 6.28}$$

Das Signal zur Kompensation der frühen Reflexionen ergibt sich aus dem gefilterten Eingangssignal unter Berücksichtigung der Übertragungspfade von den J Lautsprechern zu

---

<sup>1</sup> Da das Eingangssignal mit x bezeichnet wird, wurde für die Filter abweichend von 6.2 die Variable w gewählt.

den S Sensoren. Die Differenz aus den Zielfunktionen und dem Kompensationssignal liefert den Fehler  $e_S(n)$ .

Einsetzen für  $y(n)$ :

$$e_S(n) = d_S(n) - \sum_{j=1}^{23} \sum_{k=0}^{511} \sum_{l=0}^{511} A_{S,j}(l) \cdot w_{j,k} \cdot x(n-k-l) \quad \text{Gl. 6.29}$$

$$e_S(n) = d_S(n) - \sum_{j=1}^{23} \sum_{k=0}^{511} r_{S,j}(n-k) \cdot w_{j,k} \quad \text{Gl. 6.30}$$

$$\text{mit } r_{S,j}(n) = \sum_{l=0}^{511} A_{S,j}(l) \cdot x(n-l) \quad \text{Gl. 6.31}$$

## 5. Filteradaption

$$w_{j,k}(n+1) = w_{j,k}(n) - \mathbf{a} \sum_{S=1}^{53} e_S(n) \cdot r_{S,j}(n-k) \quad \text{Gl. 6.32}$$

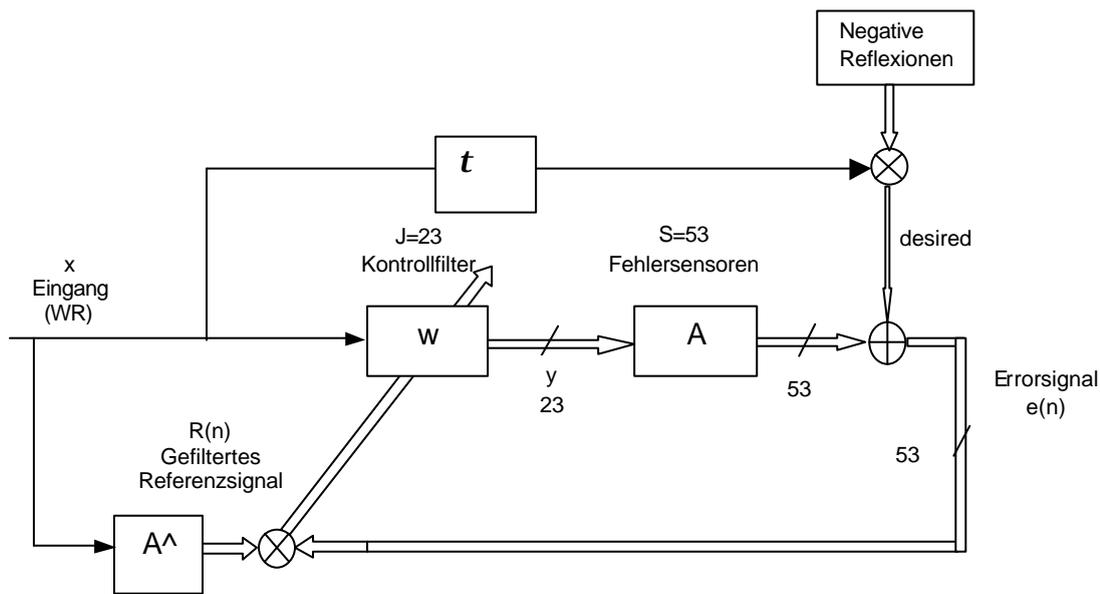
Hier wird für den nächsten Adaptionsschritt eine neues Filterset berechnet.

## 6. Maximaler Konvergenzkoeffizient

$$\mathbf{a}_{\max,j}(n) = \frac{1}{\frac{(512 + \mathbf{t})}{512} \cdot \left( \sum_{S=1}^{53} \sum_{k=1}^{512} r_{j,S}(n-k)^2 \right)} \quad \text{Gl. 6.33}$$

Der maximale Konvergenzkoeffizient ist abhängig von der Summe der Leistungen der gefilterten Referenzsignale. Er wird in jedem Adaptionsschritt neu berechnet.

Die adaptive Lösung ist sehr zeitaufwendig. Berechnungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, haben noch zu keinen brauchbaren Ergebnissen geführt.

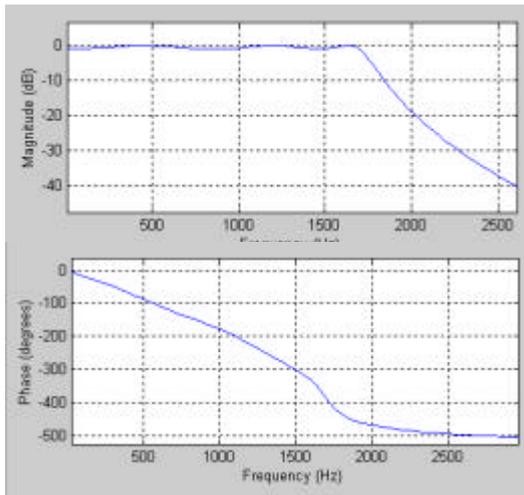


Blockschaltbild 6.2: Adaptive Filterung

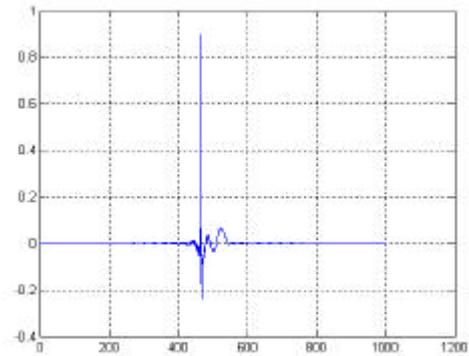
## 6.5 Realisierung

Die Realisierung erfolgt mittels  $pd$ . Dazu werden die berechneten Filtersets in den Frequenzbereich transformiert und deren Real- und Imaginärteil als 'wav-file' abgespeichert. Wie bereits erwähnt, liefert die Lösung im Frequenzbereich ein Filterset mit 1024 Koeffizienten im Zeitbereich. Soll das Eingangssignal nun mit diesen Filtern gefaltet werden (= Multiplikation im Frequenzbereich), so bedingt dies eine FFT Länge von  $2N=2048$ . Sollen alle 24 Lautsprecher quasi Freifeldverhalten aufweisen, so ergeben sich für die Kompensation jedes einzelnen Lautsprechers 23 Filtersets, deren Real und Imaginärteil mit 2048 Punkten abgespeichert werden müssen. Für alle 24 Lautsprecher bedeutet dies einen großen Speicheraufwand. Außerdem müssen 24 FFT und 24 IFFTs mit einer Länge von 2048 Punkten durchgeführt werden. Es ist daher besser, die Filter im Zeitbereich zu berechnen, was für die Realisierung ein Filterset im Frequenzbereich mit 1024 Punkten ergibt. Vor der Faltung mit den berechneten Filtern (die ja bei einer Abtastrate von 5512.5Hz vorliegen),

müssen die Eingangssignale dezimiert werden. Um kein Aliasing hervorzurufen, ist daher eine Tiefpaß Filterung erforderlich. Dazu werden Chebychef Tiefpassfilter des Typ1<sup>1</sup>, 6.Ordn mit 1 dB Welligkeit und einer Grenzfrequenz von 1700 Hz herangezogen. Gleiches gilt nach dem Upsampling. Durch die TP Filterung entstehen allerdings Phasenverschiebungen, die mittels eines Kompensationsfilters kompensiert werden.



**Abb. 6.8: Amplitudengang und Phasengang des Chebychev Filters**

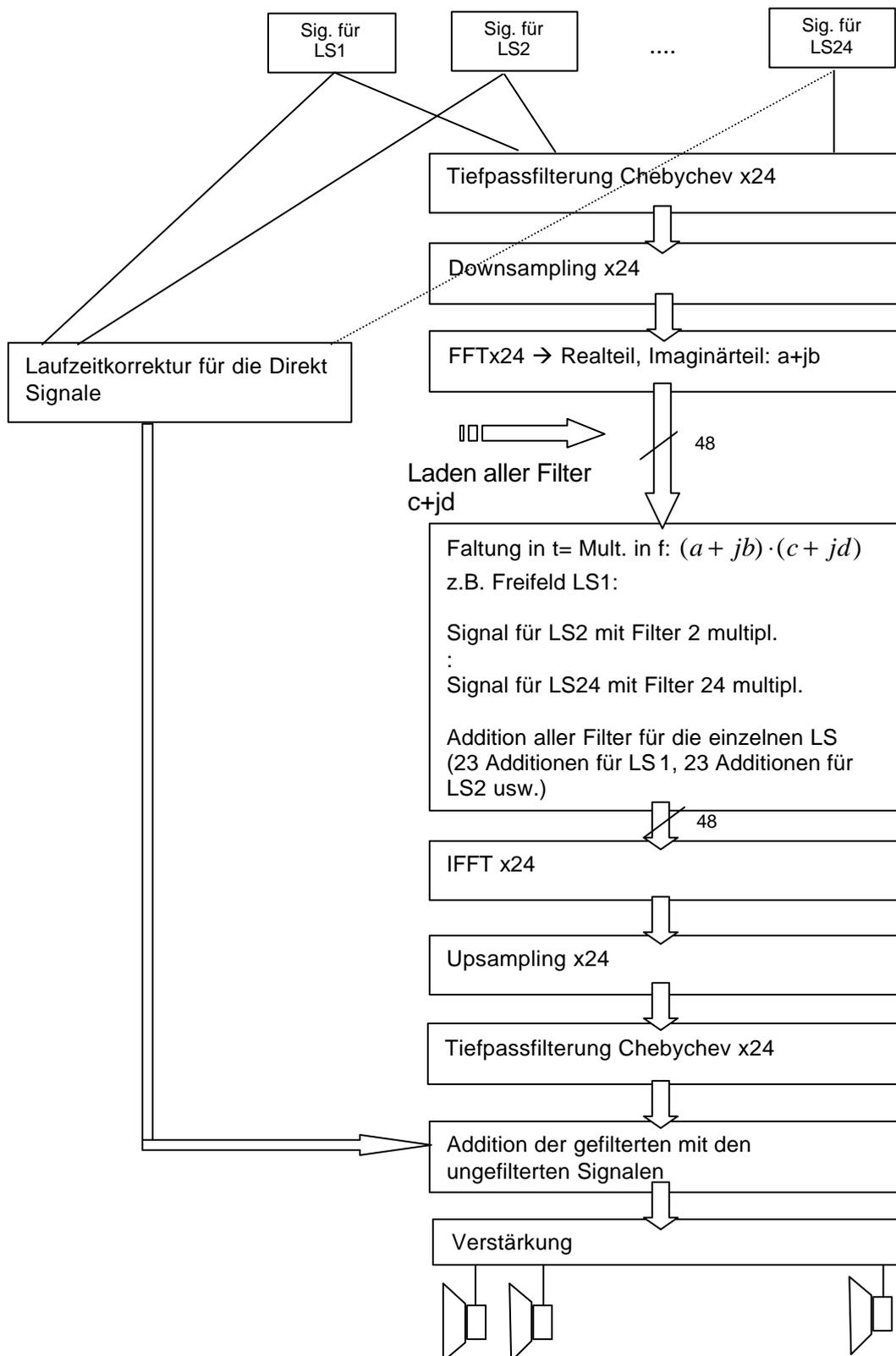


**Abb. 6.9: Filter zur Kompensation des Phasengangs**

Zur zeitlichen Korrektur der Verarbeitungszeit müssen die ungefilterten Lautsprechersignale (Direktsignale) vor der Addition mit den gefilterten Signalen verzögert werden. Daher wird für die Direktsignale eine Laufzeitkorrektur durchgeführt (siehe Blockschaltbild 6.3).

---

<sup>1</sup> Typ 1: gleichmäßige Welligkeit im Durchlaßbereich



Blockschaltbild 6.3: Filterimplementierung

## 7 Literaturverzeichnis

---

[Ahnert, Steffen]

Ahnert, Steffen: "Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis", Hirzel, Leipzig 1993

[Ando]

Ando: „Concert Hall Acoustics“, Springer Verlag, Berlin 1985

[Bartsch]

Bartsch: "Taschenbuch mathematischer Formeln“, Hanser, 1997

[Becker, Sapp, 1]

Becker, Sapp: "Synthetic soundfield for the rating of spatial perceptions“, Applied acoustics 62 (2001)

[Becker, Sapp, 2]

Becker, Sapp: "New approach in measuring auditory source width“, Institute of Communication Engineering (IENT), Aachen University of Technology (RWTH)

[Beranek]

Beranek: "Concert and Opera Halls: how they sound“, Published by the American Institute of Physics, 1996

[Berkhout]

Berkhout: "A Holographic Approach to Acoustic Control“, J. Audio Eng. Soc. Vol 36, # 12, 1998 Dezember S. 977

[Barron, Marshall]

Barron, Marshall: "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls“, J. Sound Vib. 77, 211-232, 1981

[Bobran]

Bobran: "Handbuch der Bauphysik“, Vieweg, Braunschweig, 1990

[Bradley, Souloudre]

Bradley, Souloudre: "Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields“, Ibid. S. 1-13

[Brockhaus, Riemann]

Brockhaus, Riemann: "Musiklexikon“, Piper Schott, Mainz 1979

[Bronstein]

Bronstein: "Taschenbuch der Mathematik“, Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1993

[Cremer]

Cremer: "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1", Hirzel, Stuttgart, 1978

[Dickreiter]

Dickreiter: "Handbuch der Tonstudioteknik", Sauer Verlag KG, München 1997

[Elliott, Nelson]

Elliott, Nelson: "Active Noise Control", IEEE Signal Processing Magazine, Okt. 1993

[Farina]

Farina: "Pyramid Tracing vs. Ray Tracing for the simulation of sound propagation in large rooms", Department of Industrial Engineering, University of Parma

[Fasold]

Fasold: "Schallschutz und Raumakustik in der Praxis", Verlag für Bauwesen, Berlin 1998

[Franssen]

Franssen: "Sur l'Amplification des Champs Acoustiques", Acoustica, Vol. 20, Heft 6, 1968, S. 316

[Gonzalez, Elliott]

Gonzalez, Elliott: "Minimization of the Maximum Error Signal in Active Control", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 6, No. 3, Mai 1998

[Gade]

Gade: "Prediction of room acoustical parameters", J. Acoust. Am. 89, 1857 (A), 1991

[Graber]

Graber: "Tontechnik und interdisziplinäres Sinnen. Eine grundlegende Fragestellung", Habilitationsschrift, Graz 1997

[Griesinger, 1]

Griesinger: "Improving room acoustics through time variant synthetic reverberation", homepage-Griesinger

[Griesinger, 2]

Griesinger: "General overview of spatial impression, envelopment, localization, and externalization", homepage-Griesinger

[Griesinger, 3]

Griesinger: "Objective measures of spaciousness and envelopment", homepage-Griesinger

[Griesinger, 4]

Griesinger: "Spaciousness and envelopment in musical acoustics", homepage-Griesinger

[Griesinger, 5]

Griesinger: "Recent experiences with electronic acoustic enhancement in concert halls and opera houses", homepage-Griesinger

[Griesinger, 6]

Griesinger: "The psychoacoustics of apparent source width, spaciousness and envelopment in performing spaces", Acta Acoustica Vol.83, 721-31, 1997

[Haykin]

Haykin: "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, 1991

[Ise]

Ise: "A principle of Sound Field Control Based on the Kirchhoff-Helmholtz Integral Equation and the Theory of Inverse systems", Acta Acoustica Vol.85 (1999)

[Kimura, Sekiguchi]

Kimura, Sekiguchi: "Study on criteria for acoustical design of rooms by subjective evaluation of room acoustics", (in Japanese), J. Acoust. Soc. Jpn. 32, 606-614

[Klein]

Klein: "Articulation loss of consonants as a basic for the design and judgement of sound reinforcement systems", J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 920-922

[Konig]

Konig: "The MCR system-multiple-channel amplification of reverberation ", Philipps Technical Review, Vol. 41, #1, 1983/84 S. 12

[Dokumentation]

Krejci: "Dokumentation zur Diplomarbeit", Graz, Okt. 2001

[manual SOVRA].

Krejci: "SOVRA – Simulation Of Virtual room Acoustics", Graz, Okt. 2001

[Marsch, Pörschman]

Marsch, Pörschmann: "Frequency dependent control of reverberation time for auditory virtual environments", Applied Acoustics 61 (2000)

[Nelson, Hamada]

Nelson, Hamada: "Inverse Filter Design and Equalization Zones in Multichannel Sound Reproduction", IEEE Vol.3, No.3, Mai 1995

[Okubo, Otani]

Okubo, Otani: "A system for measuring the directional room acoustical parameters", Applied Acoustics 62, (2001), 203-215

[Oppenheim, Schaffer]

Oppenheim, Schaffer: "Digital Signal Processing", Prentice-Hall, 1975

[Oppenheim, Schafer]

Oppenheim, Schafer: "Zeitdiskrete Signalverarbeitung", Oldenbourg, München Wien, 1999

[Parkin, Morgan]

Parkin, Morgan: "Assisted Resonance" in the Royal Festival Hall, London: 1965-1969, J. Acous. Soc. Of. Am., Vol 48, April 1970, S. 1025

[Peutz]

Peutz: "Articulation lost of constants as a criterion for speech transmission in a room", J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 915-919

[Poletti, 1]

Poletti: "An assisted reverberation system for controlling apparent room absorption and volume," Audio Eng. Soc. 101<sup>st</sup> Convention, Preprint 4365, 1996

[Poletti, 2]

Poletti: "On controlling the apparent absorption and volume in assisted reverberation systems," *Acustica*, vol. 78, pp 61-73, 1993

[Poletti, 3]

Poletti: "The analysis of a general assisted reverberation system," *Acta Acustica* Vol. 84, pp 766-775, Juli/August 1998

[Poletti, 4]

Poletti: "The philosophy of the Variable Room Acoustics System", homepage VRAS

[Poletti, 5]

Poletti: "The stability of single and multichannel sound systems," *Acta Acustica*. Vol.86 (2000)

[Poletti, 6]

The performance of a new assisted reverberation system", *Acta acustica*, vol. 82, pp511-524

[Prinssen, Holden]

Prinssen, Holden: "System for improved acoustic performance", Proc. I.O.A., S. 93, 1992

[Radlovic, Kennedy]

Radlovic, Kennedy: "Equalization in an Acoustic Reverberant Environment: Robustness Results", IEEE Vol.8, No.3, May 2000

[Riemann]

Riemann: "Musik Lexikon", B. Schott's Söhne, Mainz, 1967

[Rocchesso, Putnam]

Rocchesso, Putnam: "A Numerical Investigation of the Representation of Room Transfer Functions for Artificial Reverberation", Spat96/135

[Rocchesso, Smith]

Rocchesso, Smith: "Circulant Feedback Delay Networks for Sound Synthesis and Processing", ICM Proceedings 1994

[Sontacchi, Höldrich]

Sontacchi, Höldrich: "Konzepte zur Schallfeldsynthese und Schallfeldreproduktion", Jahrestagung der ÖPG, FA-Akustik

[Vanderkooy]

Vanderkooy: "Aspects of MLS Measuring Systems", J. Audio Eng. Soc. 42, 219-231

[Vian, Meynial]

Vian, Meynial: "Virtual reflecting walls for improving the acoustics of defective halls", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 103, No 5, Pt.2, S.2862, Mai 1998

[Vian, Pelorsen]

Vian, Pelorsen: "Auditorium Acoustics: What should we measure? What do we measure and what does it mean", J. Acoust. Soc. Am. 89, 1856 (A), 1991,

[Vuichard, Meynial]

Vuichard, Meynial: "On Microphone Positioning in Electroacoustic Reverberation Enhancement Systems", Acta Acoustica Vol. 86 (2000) 853-859

[Yamamoto, Zuzuki]

Yamamoto, Zuzuki: "Multivariate analysis of subjective measures for sound in rooms and the physical values of room acoustics", (in Japanese), J. Acoust. Soc. Jpn. 32, 599-605

[Zwicker]

Zwicker E.: "Psychoakustik", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1982

## Anhang

### A Grafische Oberfläche des Raumakustik - Simulationsprogramms

SOVRA  
Simulation Of Virtual Room Acoustics

Koordinateneingabe [m]

Auswahl von Standardräumen: 1 'Musikseminarraum'

Koordinaten der Raueckpunkte (x y): E1 [-4.59 5.025] E3 [6.242 -4.35]

Raumhöhe vorne, Mitte, hinten: 4.7 4.54 3.81

LS-Koordinaten (x y z): 0 4.95 1.4

Auswahl eines LS: 1

Mikrofon Koordinaten (x y z): 1 1 2

Raumdarstellung

Auralisation

Mono file  Nein stereo file  NEIN

Position des Soundfiles: c:/Simulationsprogramm/signale/

Speichern/Abspielen des gefalteten Soundfiles: c:/Simulationsprogramm/wav/

play Auralisation

play signal

Impulsantwortberechnung

Ordnung der Spiegelquellen: 4

Reflexionsgrade: 7 'individuelle Einstellung'

Darstellung des Raumes mit Spiegelquellen:  JA

Berechnung der Impulsantwort

Speichern der Impulsantwort

Zeitpunkte der 1. Reflexionen

	[ms]
Direktschall	53.6916
1. Bodenreflexion	54.6497
1. Deckenreflexion	106.562
1. Reflexion links	76.992
1. Reflexion rechts	81.3622
1. Reflexion hinten links	134.384
1. Reflexion hinten rechts	135.6527

Ambisonickodierung

c:/Simulationsprogramm/impulsantworten/

Speichern der Amb-Impulsantworten

Plot Ambisonic Impulsantworten:  Nein

Ambisonic kodierte Impulsantworten

Diplomarbeit Philipp M. Krejci  
IEM

**Abb. 1: Hauptmenu SOVRA**

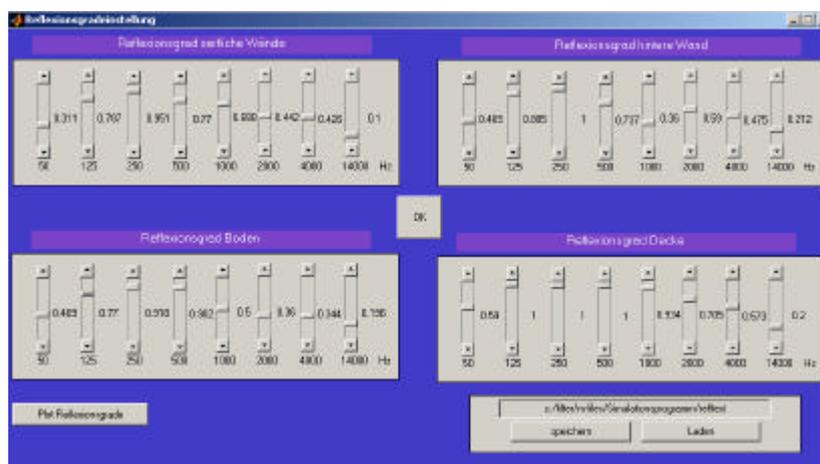
SOVRA (Simulation of Virtual Room Acoustics) ist die grafische Oberfläche zu dem im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit entwickelten Raumakustiksimulationsprogramm, das auf dem Prinzip der Spiegelquellenmethode basiert. Nach Wahl werden Spiegelquellen bis zur 4. Ordnung berücksichtigt. Mit dem Programm lassen sich sowohl vorgegebene Standardräume als auch, mit gewissen Einschränkungen, frei wählbare symmetrische Raumgeometrien simulieren. Folgende Räume stehen zur Auswahl:

Musikseminarraum, Gleichseitiges Dreieck, Gleichschenkliges Dreieck, „Schuhschachtel“ – Rechteckraum, „Wiener Musikverein“, Tunnel, Hoher Raum, Testraum 1 und Testraum 2.

Wird einer dieser Räume ausgewählt, so werden dessen Kenngrößen wie die 3 unterschiedliche Raumhöhen, die Koordinaten der Raumeckpunkte und die frequenzabhängigen Reflexionsgrade vorgegeben. Alle dieser Parameter lassen sich ausgehend von der Default Einstellung variieren. Der Musikseminarraum bietet zusätzlich die Möglichkeit, einen der 24 Lautsprecher als Schallquelle auszuwählen, wobei die passenden Koordinaten automatisch aktualisiert werden. Die Lautsprecher- und Mikrofon-Koordinaten sind innerhalb des Raumes frei wählbar. Der gewählte bzw. modifizierte Raum kann 3 dimensional dargestellt werden. Dabei werden auch das Mikrofon und der Lautsprecher abgebildet.

Was den Reflexionsgrad betrifft, so stehen 6 Presets zur Verfügung, die mit subjektiven Begriffen, wie z.B. „trocken“ oder „hallig“ beschrieben werden. Hierbei geht es nur darum, starke Gegensätze gegenüberzustellen und deren Auswirkungen auf die Impulsantwort sichtbar zu machen. Neben den Presets können die Reflexionsgrade der Wände an diskreten Frequenzen mit Schieberegler eingestellt werden, was eine Abstimmung des Raumes auf individuelle Bedürfnisse ermöglicht.

Der konstruierte Raum kann auralisiert werden. Dazu steht eine kleine Soundbibliothek mit trockenen Signalen zur Verfügung. Es besteht sowohl die Möglichkeit, ein Mono ‘wav file’ als auch ein Stereo ‘wav-file’ zu erzeugen. Im zweiten Fall werden zwei Impulsantworten berechnet, wobei die Mikrofonposition für die zweite Berechnung um 34cm verschoben wird. Verhalltes und trockenes Signal können miteinander verglichen werden. Details zum Simulationsprogramm siehe [manual SOVRA].



**Abb. 2: Fenster zur Reflexionsgradeinstellung**

## B Raumsampling

Koordinaten der Raumpunkte<sup>1</sup>

Sensor	x-Koordinate [cm]	y-Koordinate [cm]	z-Koordinate [cm]	Uhrzeit der Messung	Temp.	Luftfeuchtigkeit
1	0	0	120	9:20	23°	58%
2	8	0	120	9:35	23°	56%
3	20	0	120	9:50	23°	54%
4	38	0	120	10:00	23°	53%
5	65	0	120	10:25	23°	50%
6	-8	0	120	10:35	23°	49%
7	-20	0	120	10:50	23°	49%
7	-38	0	120	11:05	23°	48%
9	-65	0	120	11:20	23°	47%
10	0	8	120	11:30	23°	47%
11	0	20	120	11:40	23°	47%
12	0	38	120	12:00	23°	47%
13	0	65	120	12:10	23°	46%
14	0	-8	120	12:20	23°	46%
15	0	-20	120	12:40	23°	46%
16	0	-38	120	12:50	23°	46%
17	0	-65	120	13:00	23°	46%
18	0	0	126	13:15	23°	45%
19	0	0	134	13:25	23°	45%
20	0	0	114	13:45	23°	45%
21	0	0	106	14:00	23°	45%
22	-8	8	121.6	14:25	23°	44%
23	-20	20	124	14:35	23°	44%
24	-38	38	127.6	14:50	23°	43%
25	65	65	133	15:05	23°	43%
26	8	-8	118.4	15:20	23°	42%
27	20	-20	116	15:35	23°	42%
28	38	-38	112.4	15:45	23°	42%
29	65	-65	107	16:00	23°	42%
30	-8	-8	121.6	16:30	23°	42%
31	-20	-20	124	16:40	23°	42%
32	-38	-38	127.6	16:55	23°	42%
33	-65	-65	133	17:10	23°	42%
34	8	8	118.4	17:30	23°	42%
35	20	20	116	17:40	23°	42%
36	38	38	112.4	17:55	23°	42%
37	65	65	107	18:05	23°	42%

<sup>1</sup> Messung vom 5.8.2001. Alle 'wav files' siehe Dokumentations CD.

Sensor	x-Koordinate [cm]	y-Koordinate [cm]	z-Koordinate [cm]	Uhrzeit der Messung	Temp.	Luftfeuchtigkeit
38	8	-8	121.6	18:20	23°	42%
39	20	-20	124	18:35	23°	42%
40	38	-38	127.6	18:50	23°	42%
41	65	-65	133	19:05	23°	42%
42	-8	8	118.4	19:15	23°	42%
43	-20	20	116	19:35	23°	43%
44	-38	38	112.4	19:50	23°	42%
45	-65	65	107	20:00	23°	42%
46	8	8	121.6	20:15	23°	42%
47	20	20	124	20:35	23°	41%
48	38	38	127.6	20:45	23°	42%
49	65	65	133	20:55	23°	42%
50	-8	-8	118.4	21:05	23°	42%
51	-20	-20	116	21:20	23°	42%
52	-38	-38	112.4	21:30	23°	42%
53	-65	-65	107	21:40	23°	42%

## Spannungen der Endstufen

Endstufe Nr. (von oben)	Kanal 1 U [V]	Kanal 2 U [V]
1	1.388	1.362
2	1.637	1.464
3	1.718	1.551
4	1.324	1.465
5	1.535	1.411
6	1.561	1.400
7	1.348	1.420
8	1.467	1.236
9	1.297	1.420
10	1.318	1.335
11	1.024	0.960
12	0.906	0.923

Über einen Funktionsgenerator wurde ein  $3V_{SS}$  Signal über den AD Konverter ins pd „geschickt“, was dort einen Ausschlag am Pegelmesser von  $-10.82\text{dB}$  ( $0.2875$  linear peak) verursachte. Von pd wurde dann ein definierter Pegel von  $66.01\text{dB}$  ( $0.01997$  linear peak) über den DA Konverter zu den Endstufen gesandt, deren Ausgangsklemmspannungen gemessen wurden (siehe Tabelle).

## Technische Daten des Messaufbaus

Mikrofonvorverstärker	MIDIMAN	Audio Buddy
Mikrofoneingänge	Frequenzgang	5Hz – 22kHz, +/- 1dB
	Klirrfaktor (THD+N)	< 0.009%
	Rauschabstand	>69 dB
	Gain	max. 58dB

Mikrofon	Behringer	ECM 8000
	Typ	Electret Kondensator Mikrofon
	Impedanz	600Ohm
	Empfindlichkeit	-60dB
	Frequenzantwort	15Hz bis 20kHz
	Phantom Speisung:	+15V bis +48V

AD/DA Konverter	RME	ADI-8DS
	Dynamik AD	117 dBA
	THD AD	< -110 dB
	THD+N AD	< -104 dB
	Übersprechdämpfung	> 130 dB
	Dynamik DA	112 dBA unmuted
	THD DA	< -104 dB
	THD+N DA	< -102 dB
	Übersprechdämpfung	> 110 dB
	Frequenzgang AD/DA	-0.1 dB: 5Hz bis -21.5kHz

Lautsprecher	Tannoy	System 1200
	Leistung	180 W rms (Durchschnitt)
	Empfindlichkeit	95dB/1W @ 1m
	Impedanz	8 Ohm
	Frequenz Antwort	40Hz – 20kHz
	Distortion	<0.5%
	Dispersion (@ -6dB)	90° konisch
	Crossover Frequenz	1300Hz

Endstufen	Thomann	TA 500
	Leistung	2x250 Watt
	Impedanz	4 Ohm