

# **Messungen an mikroperforierten Folien im Hallraum**

Diplomarbeit

durchgeführt von

**Markus GEIGL**

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

interim. Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot KUBIN

Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard GRABER

Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard GRABER

Graz, im Dezember 2004

## Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit gliedert sich grundsätzlich in zwei große Teile. Der erste Teil zielt darauf ab, das Schallfeld im Hallraum genau zu bestimmen. Dafür wurden sowohl umfangreiche Messungen, als auch eine Computersimulation gemacht. Hintergrund für diesen Teil bildet die Norm EN 20354, die das Verfahren für (Absorptionsgrad-)Messungen im Hallraum genau beschreibt. Die Vorgaben dieser Norm werden aus theoretischer Sicht beleuchtet und verifiziert. Als Ergebnis werden Methoden vorgeschlagen, die es erlauben, gültige Messungen auch unterhalb der Grenzfrequenz des Hallraums zu gewinnen.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit mikroperforierten Folienabsorbern. Nach einer Herleitung des theoretischen Hintergrunds für das Verhalten solcher Schallabsorber werden die durchgeführten Messungen von verschiedenen Konstellationen, wie einlagige Anordnungen, ein so genanntes ‚Sandwich‘-Modell (mehrere Schichten) oder auch Anordnungen mit nicht-konstantem Abstand zur Wand, vorgenommen und ausgewertet.

## Abstract

Basically this diploma thesis is divided in two major parts. The first one aims at the accurate determination of the sound field in the TU Graz reverberation room. Therefore, extensive measurements were made on the one side, and on the other, a computer aided simulation was taken into account. Background for this part is the norm EN 20354, which describes the procedure of measuring (absorption coefficients) in reverberation rooms. The requirements of that norm are theoretically derived and verified. As a result, methods are proposed, which allow measurements that overcome limitations such as the lower critical frequency.

The second part deals with micro-perforated foil-absorbers. After the derivation of the theory for such sound absorbing materials, the accomplished measurements, namely an one-layered configuration, a so called ‘sandwich’-configuration (multiple layers) or also a configuration with non-constant spacing between foil and wall, are measured and evaluated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das Schallfeld im Hallraum</b>	<b>5</b>
1.1	Theoretischer Hintergrund .....	5
1.1.1	Die Norm: EN 20354 – ISO 354 .....	5
1.1.1.1	Anforderungen an den Hallraum.....	5
1.1.1.2	Anforderungen an den Probekörper .....	8
1.1.2	Raumakustik und raumakustische Parameter .....	9
1.1.2.1	Allgemeines zur Raumakustik .....	9
1.1.2.2	Die Nachhallzeit.....	10
1.1.2.3	EDT – Early Decay Time.....	11
1.2	Die Messung.....	12
1.2.1	Messaufbau und Messkonzept .....	12
1.2.2	Messmethode.....	18
1.2.2.1	MLS vs. Sweep .....	19
1.2.2.2	Software WinMLS2004 .....	21
1.2.3	Ergebnisse: Das Schallfeld im gemessenen Hallraum .....	21
1.2.3.1	Die erste Messung – feste Position der Quelle ( $Q_0$ ).....	23
1.2.3.2	Die zweite Messung – variable Position der Quelle ( $Q_1$ bis $Q_5$ ) .....	44
1.3	Die Simulation .....	63
1.3.1	Software CATT-Acoustic.....	63
1.3.2	Simulation mit Segelflächen .....	67
1.3.3	Simulation ohne Segelflächen .....	69
1.3.4	Diskussion: Segelflächen .....	70
1.4	Der Vergleich: Messung vs. Simulation .....	71
1.5	Schlussfolgerungen für den Hallraum der TU Graz .....	73
<b>2</b>	<b>Mikroperforierte Folienabsorber</b>	<b>75</b>
2.1	Einleitung .....	75
2.1.1	Motivation .....	75
2.1.2	Mikroperforierte Flächengebilde.....	76
2.2	Theoretischer Hintergrund .....	76
2.3	Berechnung des Absorptionsgrades .....	80
2.4	Probleme .....	84
2.5	Die 1. Messung – einschichtige Aufbauten .....	90
2.5.1	Messaufbau und Messkonzept .....	90
2.5.2	Anordnung A (10cm) .....	93
2.5.3	Anordnung B (20cm).....	94
2.5.4	Anordnung C (40cm).....	96
2.6	Die 2. Messung: Mehrschichtige Aufbauten – Das ‚Sandwich‘-Modell .....	98

---

2.6.1 Anordnung D (10cm   13cm).....	98
2.6.2 Anordnung E (10cm   15cm) .....	99
2.6.3 Anordnung F (20cm   30cm) .....	101
2.6.4 Anordnung G (25cm   30cm).....	102
2.7 Die 3. Messung – Aufbauten mit nicht-konstantem Wandabstand.....	103
2.7.1 Aufbau H (10cm \ 30cm).....	104
2.7.2 Aufbau I (10cm \ 30cm   40cm) .....	105
2.8 Beispiele: Anwendungen in der Praxis .....	107
2.8.1 Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh .....	107
2.8.2 Plenarsaal im deutschen Bundestag (Bonn) .....	108
2.8.3 Besprechungskabine .....	110
<b>3 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>
<b>4 Literaturverzeichnis</b>	<b>112</b>
<b>5 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>114</b>
<b>6 Anhang A: Inhaltsverzeichnis der CD</b>	<b>117</b>
<b>7 Anhang B: Hallraum-Messung mit WinMLS2004</b>	<b>118</b>

---

# 1 Das Schallfeld im Hallraum

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt das Schallfeld und dessen detaillierte Struktur im Hallraum am Labor für Bauphysik an der Technischen Universität Graz. Die ISO-Norm 354 bzw. die E-Norm 20354 bilden einerseits die Basis für diese Untersuchungen, andererseits sollen die Herkunft bzw. der wissenschaftlich-technische Hintergrund dieser Messvorschriften und Bedingungen genauer beleuchtet werden. Zu diesem Zweck werden umfangreiche Messungen durchgeführt. Ein Raster bestehend aus 88 Messpunkten wird in drei verschiedenen Höhen, mit zwei unterschiedlichen Methoden gemessen und ausgewertet. Zusätzlich soll eine zweite große Messung zeigen, wie sich das Schallfeld in Abhängigkeit der Quellposition ändert. Die Unterschiede der verschiedenen Mikrofonpositionen, Messmethoden und Quellpositionen werden anhand der Nachhallzeit  $T_{30}$  und auch der Early Decay Time  $EDT$  gezeigt. Eine Computersimulation des Hallraums mit dem Software-Paket CATT-Acoustic, welche den Einfluss der Segelflächen oder Diffusoren auf das Schallfeld deutlich machen soll, schließt den ersten Teil der Arbeit ab.

## 1.1 Theoretischer Hintergrund

Im Folgenden werden hier die Parameter sowohl der Messung, als auch die der Simulation genauer besprochen, da diese schließlich zur Auswertung der Mess- und Simulationsergebnisse herangezogen werden. Zunächst wird auch noch auf die genormten Messvorschriften und die Norm selbst eingegangen.

### 1.1.1 Die Norm: EN 20354 – ISO 354

#### 1.1.1.1 Anforderungen an den Hallraum

In der ISO-Norm 354<sup>1</sup> (EN 20354), die aus dem Jahr 1993 stammt (eine Änderung aus dem Jahr 1997 beschreibt verschiedene Montagearten des Prüfmaterials), wird ein genaues Procedure zur Messung des Schallabsorptionsgrades an akustischen Materialien im Hallraum festgelegt. Der Begriff ‚akustische Materialien‘ ist genauer definiert: Materialien, die zur Bekleidung von Wänden und Decken benutzt werden, oder der äquivalenten Schallabsorptionsflächen von Einzelobjekten, wie Möbelstücken, Personen oder Absorptionskörpern. Ausgeschlossen wird die Messung der Absorptionseigenschaften von schwach gedämpften Resona-

---

<sup>1</sup> vgl. [NORM]

toren. Aus diesen Messungen hervorgehende Ergebnisse können zu Vergleichszwecken oder zu Entwurfsberechnungen in der Raumakustik oder Lärmbekämpfungstechnik verwendet werden.

Die Nachhallzeit wird von den absorbierenden Eigenschaften der Raumbegrenzungsflächen und der Gegenstände im Raum beeinflusst. Im Allgemeinen hängt der Anteil der auftretenden Schalleistung, der an der Oberfläche absorbiert wird, vom Einfallswinkel ab. Nachdem die Verteilung von Schallwellen in üblichen Räumen einen großen und weithin unvorhersagbaren Winkelbereich umfasst, geht die Norm grundsätzlich von einer gleichmäßigen Verteilung aus. Ist die Schallenergiedichte in einem Raum ortsunabhängig, so spricht man von einem diffusen Schallfeld, bzw. bei Schallanteilen, die auf eine Oberfläche treffen, von stochastischem Schalleinfall.

Messungen unter Nachhallbedingungen sind vor allem deshalb notwendig, weil man auf diese Weise den Einfluss der praxis-üblichen Art der Anbringung erfassen kann. Außerdem ist es die einzige Methode, die Schallabsorption von Einzel-Objekten, wie z. B. von Stühlen, Büro-Stellwänden usw. zu ermitteln. Um oben genannte Bedingungen zu schaffen, ist es erforderlich, solche Messungen in einem Hallraum durchzuführen, da das Schallfeld in den meisten Räumen nicht diffus genug ist. Um Messergebnisse, die in verschiedenen Laboratorien gewonnen wurden zu vergleichen ist es außerdem notwendig, andere Einschränkungen bzw. Vorschriften zu treffen, z. B. in den Abmessungen des Hallraums.

Nachfolgend werden die Vorschriften der Norm angeführt und gleichzeitig mit den Werten des Hallraums der TU Graz (Institut für Hoch- und Industriebau, Labor für Bauphysik, Infeldgasse 24) verglichen. Es zeigt sich, dass der Hallraum der TU Graz die in der Norm geforderten Werte erfüllt.

	Norm ISO 354	Hallraum TU Graz
Volumen	mindestens: 150m <sup>3</sup>	Länge: 8,34m Breite: 5,99m Höhe: 4,90m Volumen: 244,79m <sup>3</sup>
Form <sup>2</sup>	$l_{\max} < 1,9\sqrt[3]{V}$	$l_{\max,HR} = \sqrt{8,34^2 + 5,99^2 + 4,90^2} = 11,38\text{m}$ $1,9\sqrt[3]{V_{HR}} = 1,9\sqrt[3]{244,79\text{m}^3} = 11,89\text{m}$ $11,38\text{m} < 11,89\text{m}$

**Tabelle 1.1:** Anforderungen und reale Daten des Hallraums der TU Graz

Um eine gleichmäßige Verteilung von Raumeigenschwingungen, insbesondere im unteren Frequenzbereich zu erzielen, dürfen zwei Raumabmessungen nicht gleich sein oder in einem Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen. Im Hallraum der TU Graz ist auch diese Bedingung erfüllt, da die Verhältnisse der Raumabmessungen 1/1,7/1,2 sind. Für eine ausreichende Diffusität des Schallfeldes werden auch Diffusoren bzw. rotierende Flügel gefordert.

<sup>2</sup> mit  $l_{\max}$  wird hier die längste freie Strecke im Raum bezeichnet; in diesem Fall die längste Raumdiagonale

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A_I$  des leeren Hallraums darf folgende Werte nicht überschreiten. Weicht das Raumvolumen von  $200\text{m}^3$  ab, so müssen die Werte mit dem Faktor  $(V/200\text{m}^3)^{2/3}$  (entspricht hier: 1,14) adaptiert werden.

Frequenz in [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{I,\text{Norm}}$ in $[\text{m}^2]$	6,5	6,5	6,5	7,0	9,5	13,0
$A_{I,\text{Norm,adpt.}}$ in $[\text{m}^2]$	7,41	7,41	7,41	7,98	10,83	14,82
$A_{I,\text{HR}}$ in $[\text{m}^2]$	1,75	2,40	3,61	4,68	7,33	11,21

**Tabelle 1.2:** Geforderte und berechnete äquivalente Schallabsorptionsfläche

Die Werte der äquivalenten Absorptionsfläche des leeren Hallraums wurden nach der in der Norm festgelegten Formel berechnet.  $A_I$  ist dabei die äquivalente Absorptionsfläche des leeren Hallraums,  $V$  ist das Volumen des leeren Hallraums,  $c$  ist die temperaturabhängige Schallausbreitungsgeschwindigkeit und  $T_1$  ist die Nachhallzeit für das jeweilige Frequenzband.

$$A_I = \frac{55,3V}{c \cdot T_1}$$

**Formel 1.1:** Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche des leeren Hallraums

Formel 1.1 ist prinzipiell Ausgangspunkt der einfachen Sabine'schen Nachhallformel (vgl. Formel 1.8), allerdings wird die Temperaturabhängigkeit der Schallausbreitungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Dabei ist  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $t$  die Temperatur in  $^\circ\text{C}$ .

$$c = 331 + 0,6t$$

**Formel 1.2:** Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur

Zum Zeitpunkt der Messung betrug die Temperatur im Hallraum  $23,5^\circ\text{C}$  (die Luftfeuchtigkeit lag mit 73% auch über den geforderten 40%). Als Beispiel sei hier die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche für die Frequenz 500Hz angeführt. Der Mittelwert der Nachhallzeit  $T_{30}$  über die 88 verschiedenen Messpositionen wurde aus den MLS-Messungen für 1,2m Höhe berechnet und beträgt 10,86s.

$$A_I = \frac{55,3 \cdot 244,79}{(331 + 0,6 \cdot 23,5) \cdot 10,86} = 3,61\text{m}^2$$

Obwohl diese Richtlinien aus einer international gültigen Norm stammen, sind sie dennoch kritisch zu bewerten. Statistisch gesehen erscheinen kleinere Räume nicht ungünstig, weil in ihnen die Zahl der den Mittelwert bildenden Reflexionen je Zeiteinheit besonders groß ist. Bei zu kleinen Räumen andererseits gelten die statistischen Überlegungen, die auf reinen geometrischen Strahlenbetrachtungen und Energieadditionen beruhen, nicht mehr.<sup>3</sup> Da die Wellenlängen der Eigenfrequenzen eines Raumes proportional zu dessen Linearabmessungen

<sup>3</sup> vgl. [CREMER 1]

sind, gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Volumen des Raumes und der niedrigsten Frequenz  $f_g$ , ab der ein Hallraum brauchbar ist.

$$f_g \sim \frac{1}{\sqrt[3]{V}}$$

**Formel 1.3:** Zusammenhang zwischen Grenzfrequenz und Raumvolumen eines Hallraums

Viele Versuche, z.B. von *Meyer* und *Kutruff*, in denen ‚gemessene‘ Werte der Nachhallzeit und ‚wahre‘ Werte verglichen wurden, zeigten, dass obige Beziehung durch die Faustformel

$$\sqrt[3]{V} \cdot f_g = 1000 \text{ (m} \cdot \text{Hz)}$$

**Formel 1.4:** Faustformel für die Grenzfrequenz

ausgedrückt werden kann. Der Verwendbarkeit eines Raumes sind aber auch nach oben hin Grenzen im Frequenzbereich gesetzt, d.h. allzu große Räume verfälschen die Ergebnisse, denn mit Volumen und Frequenz wächst nämlich die Dissipation des Schalles während der Ausbreitung und bestimmt damit immer mehr die Nachhallzeit. Daher wäre es notwendig den Dämpfungskoeffizienten  $\mu$  mit in die Berechnung einfließen zu lassen. Nachdem die Literatur allerdings sehr stark voneinander abweichende  $\mu$ -Werte aufweist, ist folgender Kompromiss getroffen worden: Bei einem Hallraum mit 200m<sup>3</sup> Volumen und einer angenommenen oberen Grenzfrequenz von 6000Hz kann eine Prüffläche von 12m<sup>2</sup> als ausreichend groß angesehen werden. Die untere Grenzfrequenz liegt bei diesem Volumen bei 170Hz. Mess- und Auswertungsfehler, bei Messungen unterhalb dieser Frequenz, können durch eine entsprechend größere Zahl von Einzelmessungen ausgeglichen werden. Wie man den Messbereich vor allem auch zu tiefen Frequenzen vergrößern kann, ist ein Ergebnis dieser Arbeit, auf das am Ende des ersten Teiles dieser Diplomarbeit noch eingegangen wird.

Obwohl es im ersten Teil dieser Arbeit zunächst um das Schallfeld im leeren Hallraum geht, sollen trotzdem gleich an dieser Stelle die Anforderungen an den zu vermessenden Gegenstand im Hallraum angeführt werden.

### 1.1.1.2 Anforderungen an den Probekörper

Der Probekörper muss eine einzelne Fläche zwischen 10 und 12m<sup>2</sup> überdecken. Für Räume mit größerem Volumen als 250m<sup>3</sup> muss die normale Prüffläche um den Faktor  $(V/250\text{m}^3)^{2/3}$  vergrößert werden (bei einem realen Raumvolumen von 244,79m<sup>3</sup> ist das natürlich nicht notwendig). Die Fläche des Probekörpers sollte rechtwinklige Form haben. Das Verhältnis von Breite und Länge sollte zwischen 0,7 und 1 liegen. Er ist so zu verlegen, dass er an keiner Stelle einen Abstand von weniger als 1m von irgendeiner Raumkante hat. Die Kanten des Probekörpers sollten nicht parallel zur nächstliegenden Kante des Raumes verlaufen. Einzelne Absorptionskörper müssen einen Abstand von mindestens 1m von jeder Raumbegrenzungsfläche oder von den Diffusoren und mindestens 1m von einem Mikrofon haben.

Nach *Meyer* und *Kutruff* erhält man den ‚wahren‘ Absorptionsgrad nur dann, wenn man so genannte Kanteneffekte, die durch Beugung des Schalles an den Begrenzungen des Prüfgegenstandes zustande kommen, ausschließt, was aber bedeuten würde, dass eine ganze Wand- oder Bodenfläche mit dem Prüfmaterial bedeckt sein muss. Nun stellt sich die Frage, ob dieser ‚wahre‘ Absorptionsgrad für die praktische Anwendung von so wesentlicher Bedeutung

ist. Zumindest kommen bei den meisten Anwendungen freie Kanten vor, so dass man an der Erfassung des Kanteneffektes durch die Messung nicht uninteressiert ist. Um auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Prüfanstalten nicht verzichten zu müssen, hat man sich auf das bereits erwähnte Verhältnis zwischen Breite und Länge des Probekörpers geeinigt.

## 1.1.2 Raumakustik und raumakustische Parameter

In diesem Abschnitt werden in aller Kürze die Grundlagen der Raumakustik wiederholt. Zum einen, da die Kenntnis der verschiedenen Teilbereiche für die Messung unerlässlich ist, zum anderen, weil so die Arbeitsweise der Simulationssoftware einsichtiger wird. Auf die verschiedenen Parameter, die sowohl bei der Messung als auch bei der Simulation eine Rolle spielen, wird näher eingegangen.

### 1.1.2.1 Allgemeines zur Raumakustik

Die Raumakustik gliedert sich grob in drei Unterbereiche<sup>4</sup>:

- Die wellentheoretische Raumakustik – Grundlage dieses Unterbereichs sind die Wellengleichungen. Das Schallfeld wird über die Eigenfrequenzen des Raumes beschrieben.
- Die geometrische Raumakustik – Dieser Teilbereich geht von einer strahlenförmigen Schallausbreitung aus. Es gelten die Gesetze der Optik, die für große und glatte Reflexionsflächen anwendbar sind, d.h. die Gesamtabmessungen müssen groß, die Rauigkeiten müssen klein im Verhältnis zur Wellenlänge sein.
- Die statistische Raumakustik – Hier wird der zeitliche Verlauf von Schallfeldparametern betrachtet.

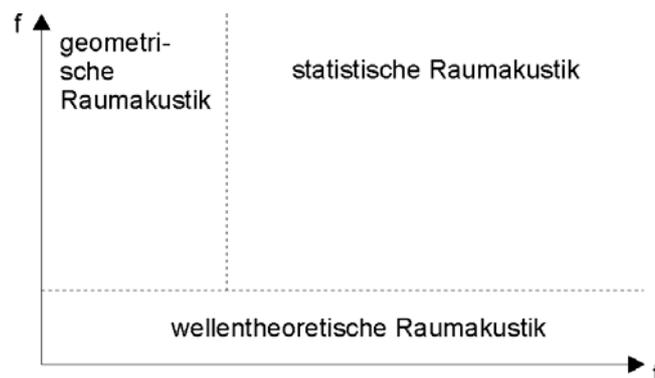


Abbildung 1-1: Die drei Unterbereiche der Raumakustik

Beim Modell der geometrischen Raumakustik steigt mit fortschreitendem Beobachtungszeitraum die Komplexität, da sich die Anzahl der Spiegelquellen drastisch erhöht. Vergleicht man

<sup>4</sup> vgl. [QUIRING]

dies mit der wellentheoretischen Raumakustik, so werden hier mit steigendem Beobachtungszeitraum die Eigenfrequenzen immer dichter, wodurch ihre Aussagekraft sinkt. 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 gleich verteilt. Hier geht man zur statistischen Raumakustik über, bei der die geometrischen Gegebenheiten des Raumes außer Acht gelassen werden. Die wesentlichste Größe in diesem Teilbereich ist die Nachhallzeit  $T_N$ .

### 1.1.2.2 Die Nachhallzeit

Betrachtet man ein Wellenpaket mit der Anfangsenergie  $E_0$ , das sich im Raum ausbreitet, so wird die Energie nach jeder Reflexion abnehmen. Nach einer Reflexion beträgt sie  $E_0(1-\alpha)$ , wobei  $\alpha$  der Absorptionsgrad ist. Die Anzahl der Reflexionen eines Wellenpaketes wird als mittlere Stoßzahl  $\bar{n}$  bezeichnet.

$$\bar{n} = \frac{S \cdot c}{4V}$$

**Formel 1.5:** Mittlere Stoßzahl eines Wellenpaketes

Hierbei ist  $S$  die Oberfläche,  $V$  das Volumen des gesamten Raumes und  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Einheit der mittleren Stoßzahl ist  $[s^{-1}]$ .

Da die längs des Strahles transportierte Energie sich bei jeder Reflexion um den Bruchteil  $\rho = 1 - \alpha$  vermindert, ist die Gesamtenergie im Raum nach der Zeit  $t$  (für  $t > 0$ ) auf

$$E(t) = E_0(1 - \alpha)^{\bar{n}t} = E_0 \cdot e^{\left[ \frac{cSt}{4V} \ln(1 - \alpha) \right]}$$

**Formel 1.6:** Zeitlicher Verlauf des Nachhalls

gesunken<sup>5</sup>. Diese Gleichung beschreibt also den Zeitverlauf des Nachhalls, d.h. das Abklingen der Schallenergie im Raum, der zur Zeit  $t = 0$  mit einem Impuls oder mit einem bei  $t = 0$  abrupt endenden Schallsignal angeregt wurde.

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

$$\frac{E}{E_0} = 10^{-6} = e^{\left[ \frac{cSt}{4V} \ln(1 - \alpha) \right]}$$

$$\ln 10^{-6} = \frac{Sct}{4V} \ln(1 - \alpha)$$

---

<sup>5</sup> mit  $(1 - \alpha)^x = e^{x \ln(1 - \alpha)}$

$$t = T_N = \frac{4V \cdot \ln 10^{-6}}{Sc \ln(1 - \alpha)} = 13,82 \cdot \frac{4V}{-Sc \ln(1 - \alpha)}$$

Setzt man nun für die Schallgeschwindigkeit  $c = 344 \text{ms}^{-1}$  ein, so erhält man die Nachhallzeit nach Eyring:

$$T_N = 0,161 \cdot \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)}$$

**Formel 1.7:** Eyring'sche Nachhallzeit

Für kleine und auch mittlere Schallabsorptionsgrade kann dies vereinfacht werden, indem  $\ln(1 - \alpha)$  durch  $-\alpha$  angenähert wird. Man erhält dann

$$T_N = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha S}$$

**Formel 1.8:** Sabine'sche Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist einer der ältesten und wichtigsten Parameter bei der akustischen Beurteilung von Räumen. In dieser Arbeit wird vor allem auch der Begriff T30 für Nachhallzeiten verwendet. Diese Terminologie wird aus der Software WinMLS2004 zur Messung der Nachhallzeit und auch aus CATT-Acoustic übernommen und kommt von der Tatsache, dass es auf Grund des Signal-Rausch-Abstandes bei den meisten Messungen nicht möglich ist den gesamten 60dB-Abfall der Abklingkurve zu messen. Daher wird beispielsweise der Abfall von -5dB auf -35dB gemessen und extrapoliert, so dass wiederum die Zeit bestimmt ist, die dem Abfall von 0dB auf -60dB gleichkommt.

### 1.1.2.3 EDT – Early Decay Time

Die EDT (Anfangsnachhallzeit, frühe Nachhallzeit) ist eine genauere Charakterisierung der Nachhallzeit. Da der Anfangsteil des Abklingvorganges im Allgemeinen besser wahrgenommen wird als der gesamte 60dB-Abfall der Nachhallzeit, dominiert er auch den subjektiv empfundenen Nachhall. Hinzu kommt, dass die Kennzeichnung der Nachhalldauer durch die Nachhallzeit nur dann sinnvoll ist, wenn das Abklingen der Nachhallenergie wenigstens annähernd exponentiell erfolgt (vgl. Formel 1.6). In anderen Fällen ist es, wie schon erwähnt, die anfängliche Abklinggeschwindigkeit, die bei fortlaufender Sprache oder Musik den Nachhalleindruck des Zuhörers bestimmt. Diese Einsicht hat überhaupt erst zur Einführung der frühen Nachhallzeit geführt. Sie ist also in erster Linie eher ein akustisches Gütemaß für Räume und es scheint, dass sie für Messungen von Absorptionsgraden oder Schallfeldern allgemein keine wesentliche Rolle spielt. Aber gerade bei der genauen Bestimmung des Schallfeldes in einem Raum kann die EDT herangezogen werden, da sie eine deutlich höhere Ortsabhängigkeit aufweist, als beispielsweise die T30. In den Messergebnissen wird dies vor allem im tieffrequenten Bereich deutlich. Die Anfangsnachhallzeit wird nun bestimmt, indem man einen Abfall von 0 auf -10dB misst und diesen anschließend auf -60dB extrapoliert. Dabei werden unterschiedliche Raummoden, die die entsprechende Steigung des Abfalls bewirken, vernachlässigt.

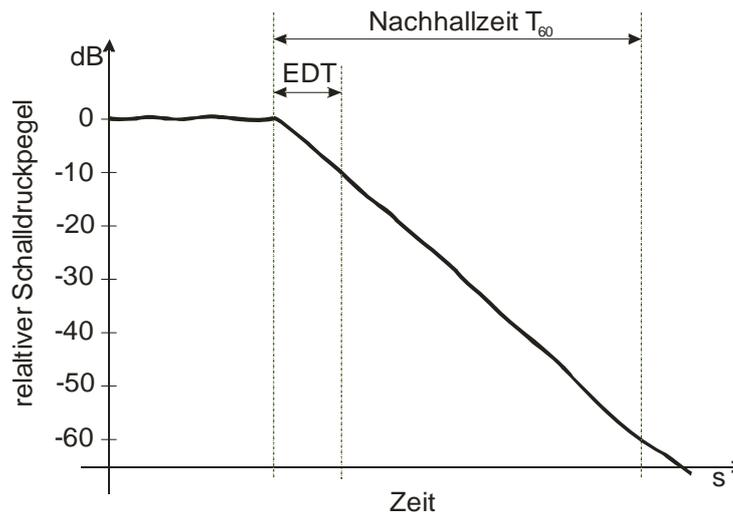


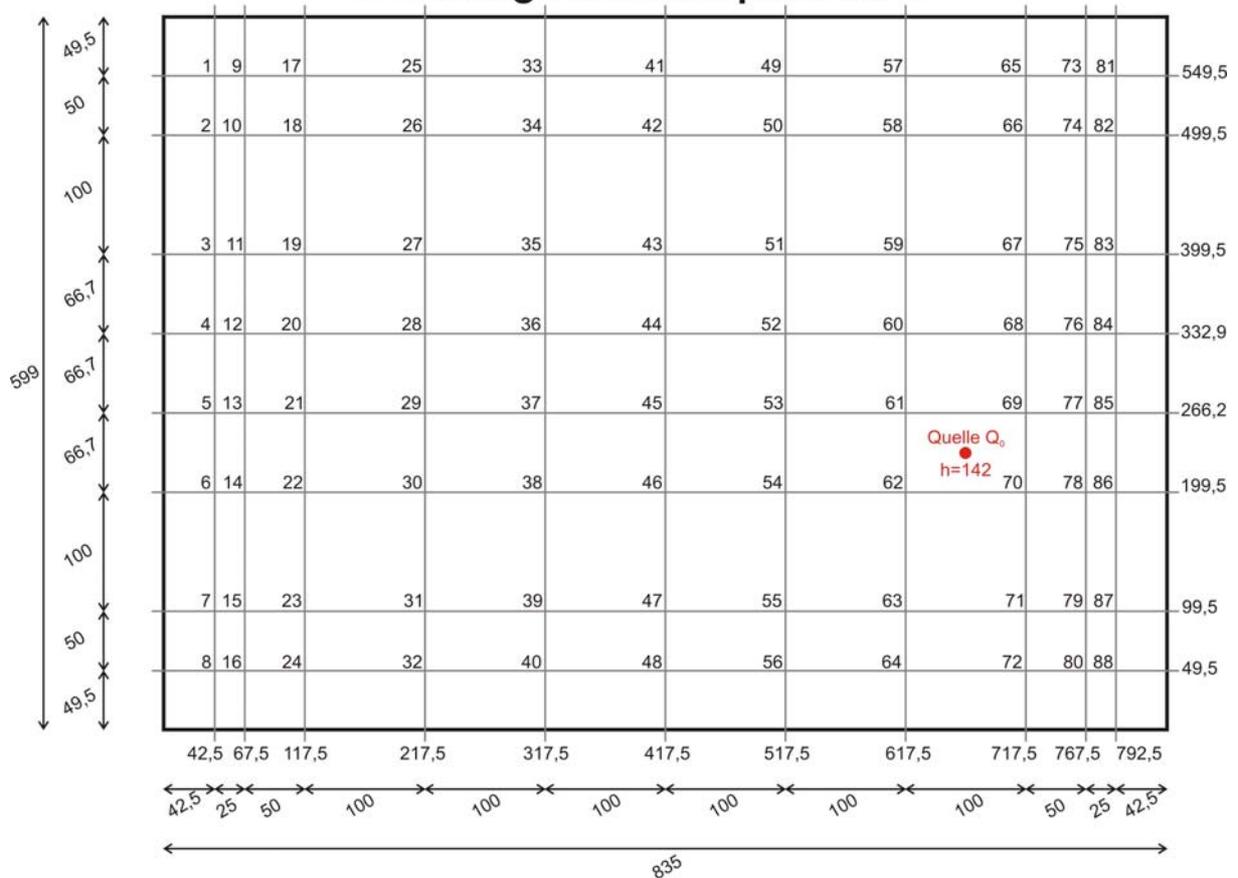
Abbildung 1-2: Early Decay Time und Nachhallzeit

## 1.2 Die Messung

### 1.2.1 Messaufbau und Messkonzept

Zur Bestimmung des Schallfeldes im Hallraum wurden grundsätzlich zwei verschiedene Messaufbauten verwendet. In der ersten Messung war die Quelle an einer festen Position und die Messmikrofone waren an 88 verschiedenen Punkten im Raum verteilt. Diese 88 Punkte wurden in 3 verschiedenen Höhen (0,5m, 1,2m und 2,0m) gemessen. Als Erregersignal dienten einerseits eine so genannte Maximum-Length-Sequence (MLS) und andererseits ein logarithmischer Sinus-Sweep, um die Vor- und Nachteile, auf die in Kapitel 1.2.2.1 noch näher eingegangen wird, der jeweiligen Methode zu vergleichen und – falls notwendig – auch zu kompensieren. Dies ergibt für die erste Messung eine Anzahl von 528 Messergebnissen (88 Punkte mal 3 verschiedene Höhen mal zwei verschiedene Erregersignale). Nachdem man davon ausgehen kann, dass das Schallfeld in der Mitte des Raumes, allein durch die geometrischen Gegebenheiten, diffus ist, wurde das Raster zu den Wänden des Hallraums absichtlich enger gewählt, um eventuelle Besonderheiten an den Begrenzungsflächen beobachten zu können. Ziel dieser ersten Messung war die Beschaffenheit des Schallfeldes im Hallraum möglichst genau zu bestimmen.

## Messung Hallraum | Raster 1



**Abbildung 1-3:** Das Raster für die erste Messung (Bestimmung des Schallfeldes)

Für die zweite Messung wurde ein Subset von 16 Mikrofonpositionen mit verschiedenen Höhen aus den vorhergehenden 88 Positionen bestimmt. Auch diese Punkte waren so im Raum verteilt, dass sowohl in der Raummitte als auch zu den Begrenzungsflächen hin genügend Messpunkte vorhanden waren. Der Unterschied zur ersten Messung ist, dass hier die Position und auch die Höhe der Quelle im Raum verändert wurden. Die zweite Messung zielt darauf ab, den Einfluss der Quellposition auf das Schallfeld im Hallraum zu bestimmen.

## Messung Hallraum | Raster 2

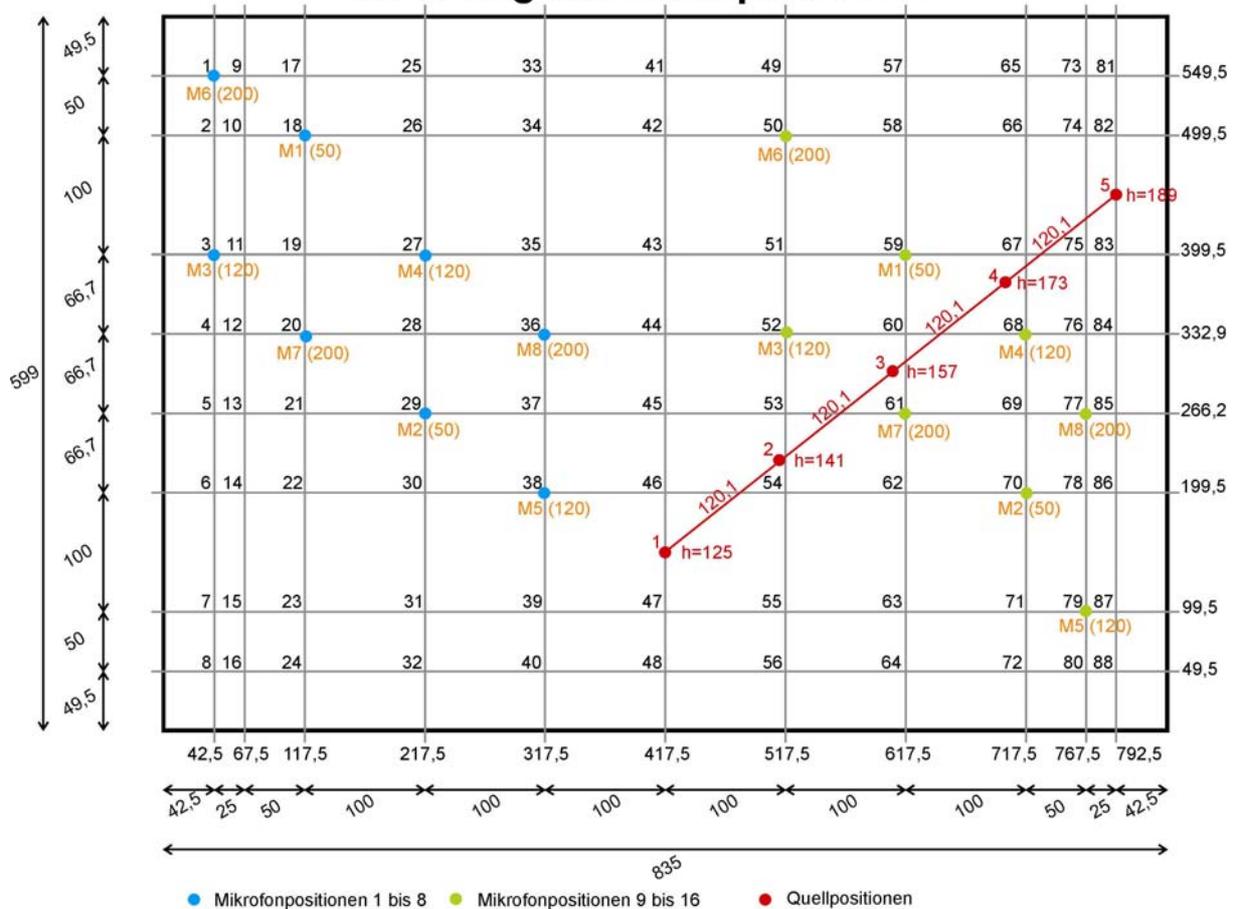


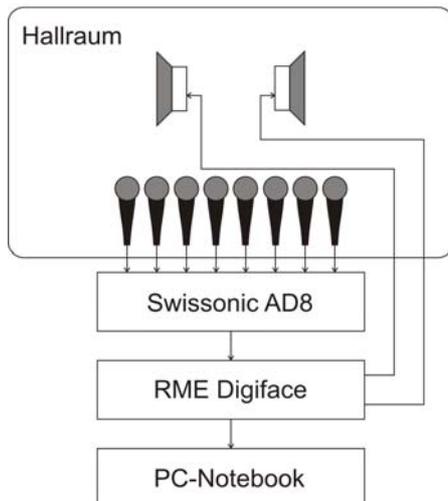
Abbildung 1-4: Das Raster für die zweite Messung (Einfluss der Quellposition auf das Schallfeld)

Für die Messung standen 8 Mikrofone (AKG C480B mit CK62-ULS)<sup>6</sup> mit Kugelcharakteristik, ein A/D-Wandler (Swissonic AD8) sowie ein PC-Notebook zur Verfügung. Die digitalisierten Signale wurden über die ADAT-Schnittstelle des RME-Digiface ins Notebook übertragen. Als Messsoftware wurde WinMLS2004 verwendet.



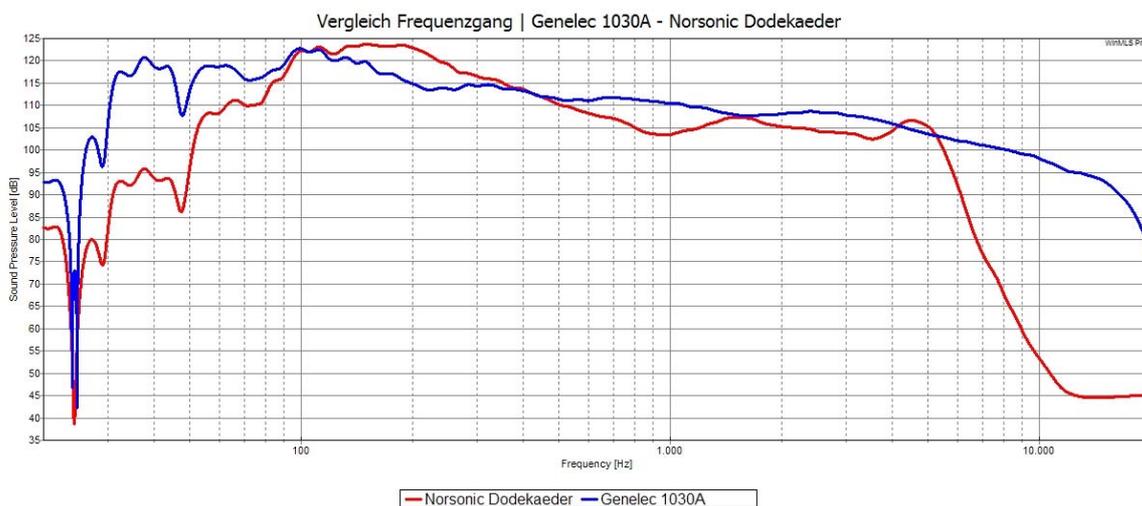
Abbildung 1-5: links: Messplatz mit PC, Wandler und Audio-Interface, rechts: Mikrofonaufstellung

<sup>6</sup> INW Inventar-Nr. M17b-21b und 41b-43b, die Kapseln wurden entsprechend dieser Nummer auf die Speise-teile montiert



**Abbildung 1-6:** links: symbolischer Messaufbau, rechts: Signalquelle 2 Genelec 1030A (back-to-back)

Die Signalquelle bildeten zwei Studio-Monitor-Lautsprecher der Marke Genelec (Modell 1030A), die in einer back-to-back Aufstellung einen Kugelstrahler nachbilden sollten. Dies ist vor allem für tiefe Frequenzen gegeben, wie in Abbildung 1-8 zu sehen ist, wobei man erwähnen muss, dass diese Polar-Darstellung aus einer Messung einer einzelnen Lautsprecherbox stammen und nicht etwa diese back-to-back Aufstellung, die für die Untersuchungen hier verwendet wird, gemessen wurde. Außerdem weisen diese Lautsprecher eine wesentlich größere Linearität im Amplituden-Frequenzgang zu hohen und tiefen Frequenzen hin auf, als der zuerst getestete Kugelstrahler von Norsonic, der auch auf Grund seines Eigengeräusches (in Verbindung mit dem dazugehörigen Verstärker), welches den Signal-Rausch-Abstand verschlechtern würde, nicht benutzt wurde (vgl. Abbildung 1-7).



**Abbildung 1-7:** Vergleich der Frequenzgänge von Genelec 1030A und Norsonic Dodekaeder

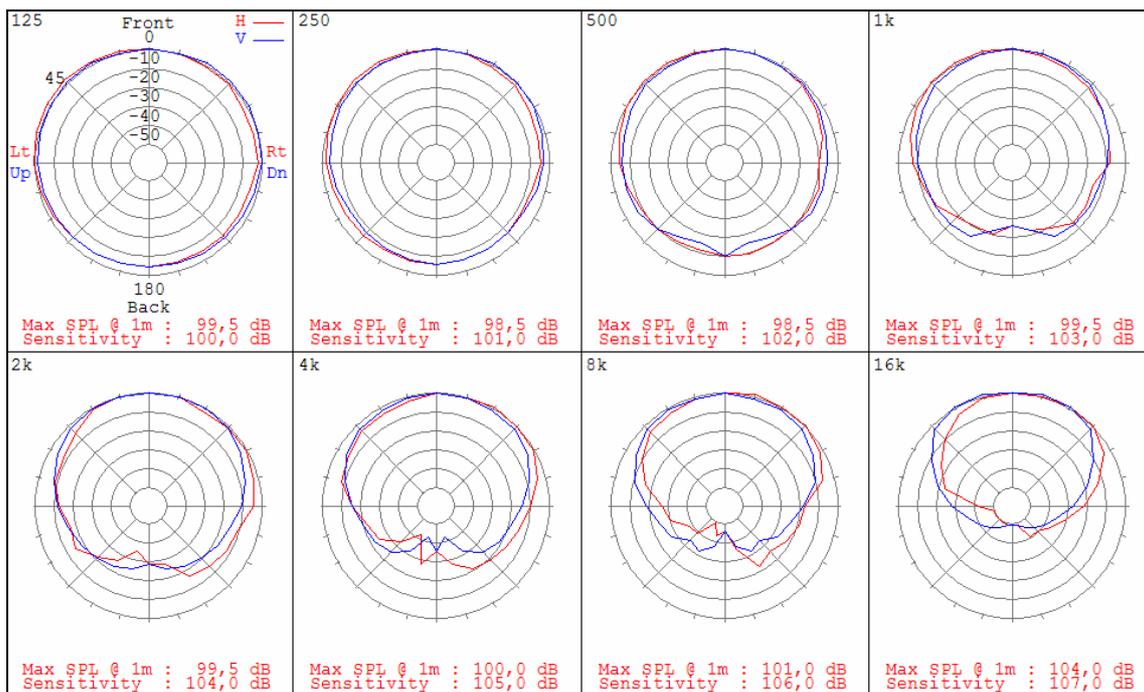


Abbildung 1-8: Das frequenzabhängige Abstrahlverhalten der Mess-Lautsprecher Genelec 1032A

Des Weiteren wurden verschiedene Testmessungen durchgeführt, die die Konsistenz der jeweiligen Messmethode (MLS oder Sweep), sowie der Messung allgemein, zeigen sollen. Die in den nächsten Abbildungen (Abbildung 1-9 bis Abbildung 1-11) dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen so gering sind, dass auf eine mehrmalige Messung der einzelnen Punkte und Mittelung der Ergebnisse verzichtet werden konnte. Zumal immer noch zwei verschiedene Ergebnisse pro Punkt (MLS und Sweep) zum Verifizieren der gemessenen Daten zur Verfügung stehen.

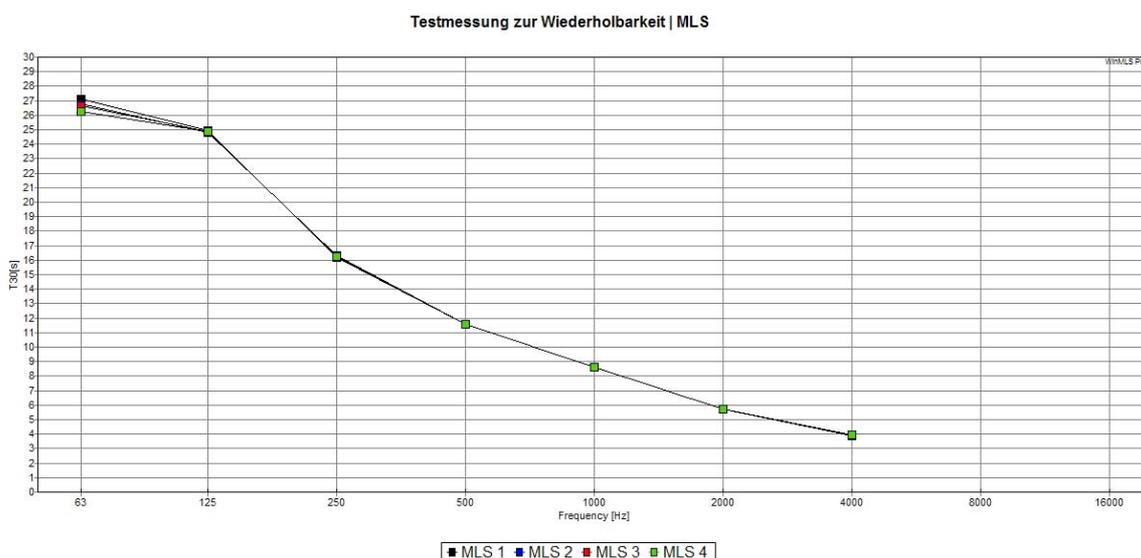


Abbildung 1-9: Vier gleiche Messungen mit MLS-Folge (WinMLS2004 liefert für 8kHz und 16kHz keine Werte bei MLS-Messungen)

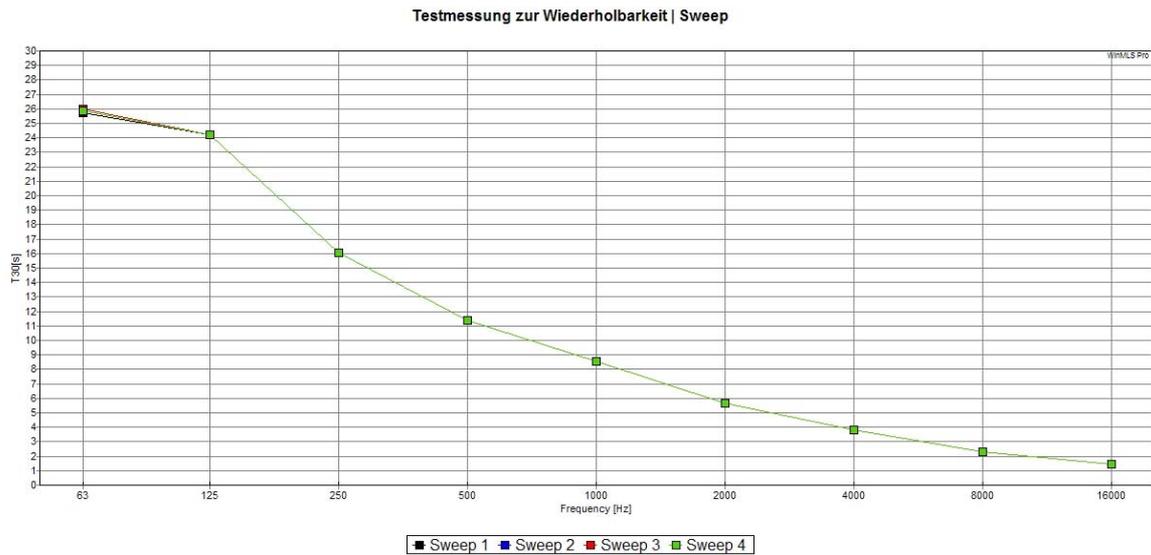


Abbildung 1-10: Vier gleiche Messungen mit Sinus-Sweep

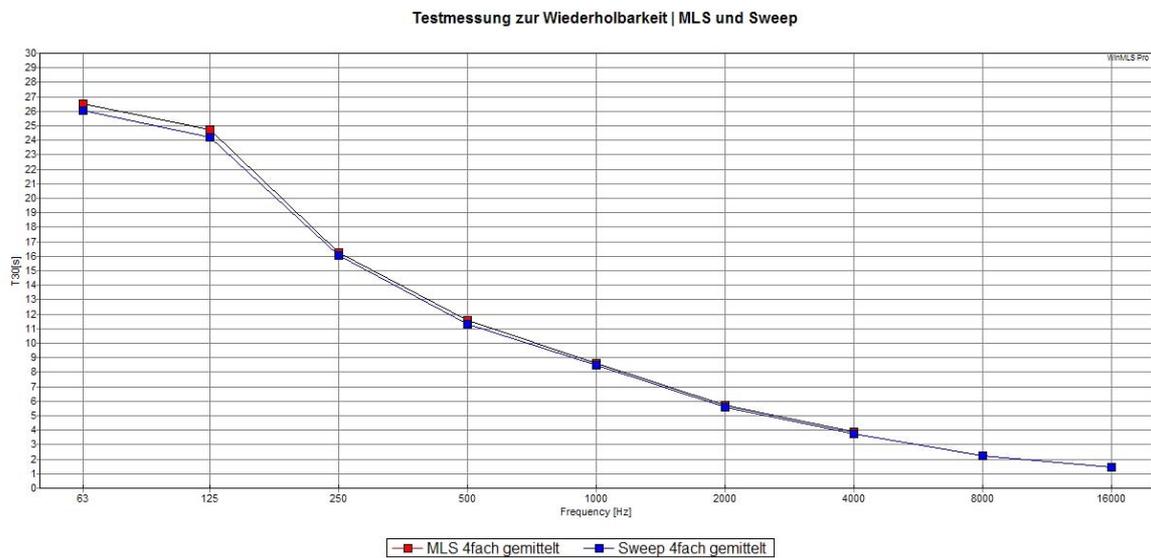


Abbildung 1-11: Die gemittelten Werte für MLS und Sweep im Vergleich

In den Testmessungen mit einer Methode (MLS bzw. Sinus-Sweep) zeigt sich, dass es nur für die tiefen Frequenzen leichte Unterschiede der Ergebnisse gibt, zu hohen Frequenzen hin werden diese Unterschiede noch geringer. Für einen Vergleich der beiden Messmethoden wurden jeweils vierfach gemittelte Messungen durchgeführt. Hier ist zu erkennen, dass die MLS-Methode etwas höhere Ergebnisse liefert. In Tabelle 1.3 sind die Ergebnisse aus Abbildung 1-11 als Zahlenwerte zusammengefasst.

Frequenz in [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
T30 (MLS) in [s]	26.53	24.75	16.24	11.56	8.63	5.7	3.91
T30 (Sweep) in [s]	26.05	24.18	16.03	11.34	8.48	5.58	3.77
Differenz in [s]	0.48	0.57	0.21	0.22	0.15	0.12	0.14
Abweichung in [%]	1.81	2.30	1.29	1.90	1.74	2.11	3.58

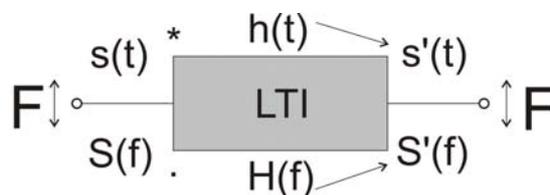
**Tabelle 1.3:** Vergleich der beiden Messmethoden (log. Sinus-Sweep und MLS) bezüglich ihrer Ergebnisse einer 4-fach gemittelten Nachhallzeit-Messung

## 1.2.2 Messmethode

Gemessen wird die so genannte Impulsantwort des Raumes. Mit dieser ist es möglich eine große Anzahl an akustischen Parametern zu bestimmen. Prinzipiell gilt, je genauer die Messung sein soll, desto höher muss der Signal-Rausch-Abstand der gemessenen Impulsantwort sein. Üblicherweise werden Impulsantworten folgendermaßen gemessen: Ein (bekanntes) Eingangssignal wird im Raum wiedergegeben und der „Ausgang des Systems“, also die Antwort des Raumes wird gemessen. Dabei ist die Wahl des Erregersignals von entscheidender Bedeutung.

- Das wiedergegebene Signal muss vollständig reproduzierbar sein.
- Das Erregersignal und die Methode der Entfaltung sollen den Signal-Rausch-Abstand der Impulsantwort maximieren.
- Das Erregersignal und die Methode der Entfaltung sollen die Möglichkeit bieten, nicht-lineare Artefakte in der Impulsantwort zu eliminieren.

Für digitale Messverfahren ist die Annahme eines linearen, zeitinvarianten Systems (LTI-System, linear time invariant) die wichtigste Voraussetzung. Abbildung 1-12 zeigt den Signalweg über lineare zeitinvariante Systeme. Das Eingangssignal  $s(t)$  bzw.  $S(f)$  und das Ausgangssignal  $s'(t)$  bzw.  $S'(f)$  sind über die Systemantwort auf einen Dirac-Stoß (Impulsantwort  $h(t)$ ) bzw. über die (stationäre) Übertragungsfunktion  $H(f)$  verknüpft, und zwar im Zeitbereich durch eine Faltung (oberer Pfad)<sup>7</sup> und im Frequenzbereich durch eine Multiplikation (unterer Pfad)<sup>8</sup>.



**Abbildung 1-12:** Signalweg über lineare zeitinvariante (LTI-) Systeme, vgl. [MÜLLER, S.44]

<sup>7</sup> dabei ist \* das Faltungssymbol

<sup>8</sup> vgl. [MÜLLER]

Die grundlegenden Eigenschaften eines LTI-Systems sind

- Linearität: Die Systemeigenschaften sind invariant gegenüber z.B. Änderungen des Eingangspegels.
- Zeitinvarianz: Das System verhält sich zeitlich konstant.

Der Signalweg, formuliert im Zeitbereich, liest sich

$$s'[n] = s[n] * h[n] = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} s[m]h[n-m].$$

**Formel 1.9:** Faltungssumme

Das Gleiche, formuliert im Frequenzbereich, bedeutet

$$S'(f) = S(f) \cdot H(f).$$

Mit anderen Worten bedeutet das allgemein, eine Faltung im Zeitbereich entspricht einer Multiplikation im Frequenzbereich. In Abbildung 1-12 ist der zeitkontinuierliche Fall angegeben (zu erkennen an der laufenden Variablen  $t$ ), an sich liegen aber zeitdiskrete Signale (in Formel 1.9 durch die laufende Variable  $n$  gekennzeichnet) vor.

### 1.2.2.1 MLS vs. Sweep

Die am weitesten verbreiteten Erregersignale zur Messung von Raumimpulsantworten sind die Maximalfolge (maximum length sequence, MLS) und der Sinus-Sweep, deren Vor- und Nachteile hier erläutert werden<sup>9</sup>.

#### *Sinus-Sweep*

Die Sweep-Methode wurde von *Farina*<sup>10</sup> entwickelt und basiert auf folgender Idee: Mit einem zeitlich exponentiell wachsendem Frequenz-Sweep ist es gleichzeitig möglich die lineare Impulsantwort des Systems zu gewinnen und jede Impulsantwort, die zu einer harmonischen Verzerrung gehört, zu separieren. Die harmonischen Verzerrungen treten vor der linearen Impulsantwort auf. Auf Grund dieser Tatsache ist die lineare Impulsantwort frei von jeglicher Nicht-Linearität. Das Signal wird nach folgender Gleichung generiert:

$$x(t) = \sin \left\{ \frac{T\omega_1}{\ln(\omega_2/\omega_1)} \left[ e^{(t/T)\ln(\omega_2/\omega_1)} - 1 \right] \right\}$$

**Formel 1.10:** Generierung des Sinus-Sweep

Dabei ist  $\omega_1$  die Anfangskreisfrequenz und  $\omega_2$  die Endkreisfrequenz des Sweeps der Dauer  $T$ .

<sup>9</sup> vgl. [STAN] und [GRABER]

<sup>10</sup> vgl. [FARINA]

Die Entfaltung der Impulsantwort geschieht mittels einer linearen Faltung (vgl. Formel 1.9) des gemessenen Signals mit der Inversen des Erregersignals, wodurch Aliasing-Probleme vermieden werden können.

### MLS

Die MLS-Messmethode geht auf *Schroeder*<sup>11</sup> zurück und basiert auf der Anregung eines Raumes mit einem periodischen, pseudo-zufälligen Signal mit einer Autokorrelationsfolge, die einer Dirac-Stoß-Folge sehr nahe kommt. Sie werden aus einem deterministischen (exakt reproduzierbaren) Prozess mit Hilfe eines rückgekoppelten binären Schieberegisters gewonnen, wie in Abbildung 1-13 gezeigt. Die Anzahl der Samples einer Periode eines MLS-Signals  $m$ -ter Ordnung ist  $L=2^m-1$ . Die Impulsantwort erhält man durch zirkuläre Kreuzkorrelation zwischen dem gemessenen Ausgang und der MLS-Sequenz. Auf Grund dieser zirkulären Operationen zur Entfaltung erhält man die periodische Impulsantwort  $h'[n]$ , die wie folgt mit der linearen Impulsantwort zusammenhängt.

$$h'[n] = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h[n + lL]$$

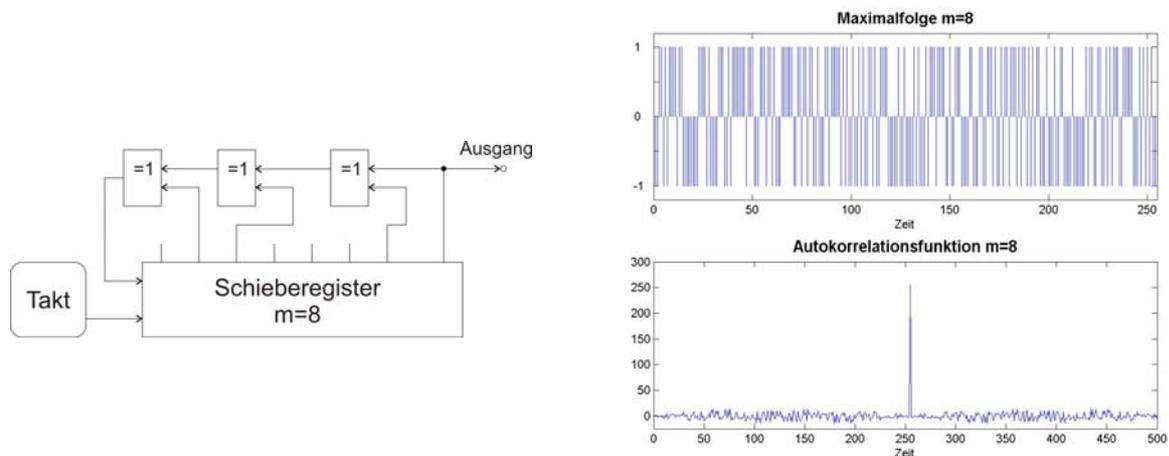
**Formel 1.11:** Zusammenhang zwischen periodischer und linearer Impulsantwort

Formel 1.11 zeigt das Problem der MLS-Methode: mögliche Fehler durch Aliasing. Dieser Fehler wird signifikant, falls die Länge  $L$  einer Periode kürzer ist als die zu messende Impulsantwort, d. h. die Ordnung  $m$  muss diese Bedingung erfüllen und daher hoch genug sein. Beispielsweise wäre die Periodendauer 12s für ein System 19ter-Ordnung bei einer Abtastfrequenz von 44,1kHz. Da das Phasenspektrum jeder MLS-Sequenz stark im Intervall  $[-\pi, +\pi]$  mit einer gleich verteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion schwankt, ist es mit dieser Methode möglich das Phasenspektrum einer beliebigen Komponente, die nicht mit dem Eingangssignal korreliert, willkürlich anzuordnen. Das hat den großen Vorteil, dass Störsignale entlang der ganzen entfalteten Impulsantwort verteilt werden, an Stelle von diskret auf der Zeitachse auftretenden Störungen. Mit anderen Worten weist diese Messmethode eine hohe Immunität gegenüber Störgeräuschen auf. Ein Nachteil ist, dass bei dieser Methode Artefakte durch Verzerrungen auftreten. Diese sind entlang der Impulsantwort mehr oder weniger gleich verteilt, kommen durch Nicht-Linearitäten des Messsystems zustande, und können allerdings durch geeignete Wahl der Parameter des Messsystems (z.B. Amplitude des Erregersignals) reduziert werden.

Prinzipiell kann man sagen, dass die Messung mit einem Sinus-Sweep als Erregersignal sehr gut für Untersuchungen in leisen Räumen geeignet ist. Die vollständige Unterdrückung von harmonischen Verzerrungen und der sehr gute Signalrauschabstand sprechen für sich. Für eine Untersuchung mit der Anwesenheit von Störgeräuschen ist natürlich die MLS-Methode vorzuziehen.

---

<sup>11</sup> vgl. [SCHROEDER]



**Abbildung 1-13:** links: Erzeugung einer Maximalfolge mit einem Schieberegister (Ordnung  $m = 8$ , Länge 255) rechts oben: eine Periode der Maximalfolge, rechts unten: Autokorrelationsfunktion der Maximalfolge<sup>12</sup>

Da es bei den Messungen im Hallraum der TU Graz selten zu Störungen akustischer Art kommt, wird für die Messungen, die die Grundlage für den zweiten Teil dieser Arbeit bilden (Messungen mit Absorber), nur die Messmethode mit dem logarithmischen Sinus-Sweep angewendet, da der bessere Signal-Rausch-Abstand dieser Messungen eine wesentliche Bedeutung bei der Berechnung der Nachhallzeiten hat, zumal die Ergebnisse nur in sehr geringem Maß von denen der MLS-Messung abweichen.

### 1.2.2.2 Software WinMLS2004

Das Softwarepaket WinMLS2004<sup>13</sup>, das für die Messungen im Rahmen dieser Diplomarbeit in einer Testversion mit vollem Funktionsumfang zur Verfügung stand, erlaubt es die Raumimpulsantwort mit verschiedenen Methoden, darunter auch der logarithmischen Sinus-Sweep und die maximum length sequence (MLS), zu messen. Die Impulsantwort wird im programmeigenen Format gespeichert. Mit Hilfe dieser Impulsantwort können eine Reihe von post-processing Berechnungen und vor allem grafische Auswertungen erfolgen. Erwähnenswert ist, dass die Berechnungsergebnisse in einer für Tabellenkalkulationen kompatibler Form ausgegeben werden. Auch das programmeigene Speicherformat für die Impulsantworten kann in anderen Anwendungen, wie beispielsweise MATLAB, geladen werden.

## 1.2.3 Ergebnisse: Das Schallfeld im gemessenen Hallraum

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen im leeren Hallraum, also noch ohne Absorberelemente, dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nicht alle Diagramme abgebildet. Es wird eine Auswahl getroffen, an Hand derer die Ergebnisse deutlich nachvollziehbar sind. Im Anhang finden sich jedoch alle Diagramme. Für

<sup>12</sup> vgl. [MÜLLER]

<sup>13</sup> vgl. [MORSET]

den Vergleich mit der Simulation können ohnehin nur die Diagramme für die jeweiligen Oktavbänder herangezogen werden, da das Simulationsprogramm nur für diese Werte liefert. Für die Auswertung der Messungen wurde das Spektrum allerdings in Terzbänder aufgeteilt.

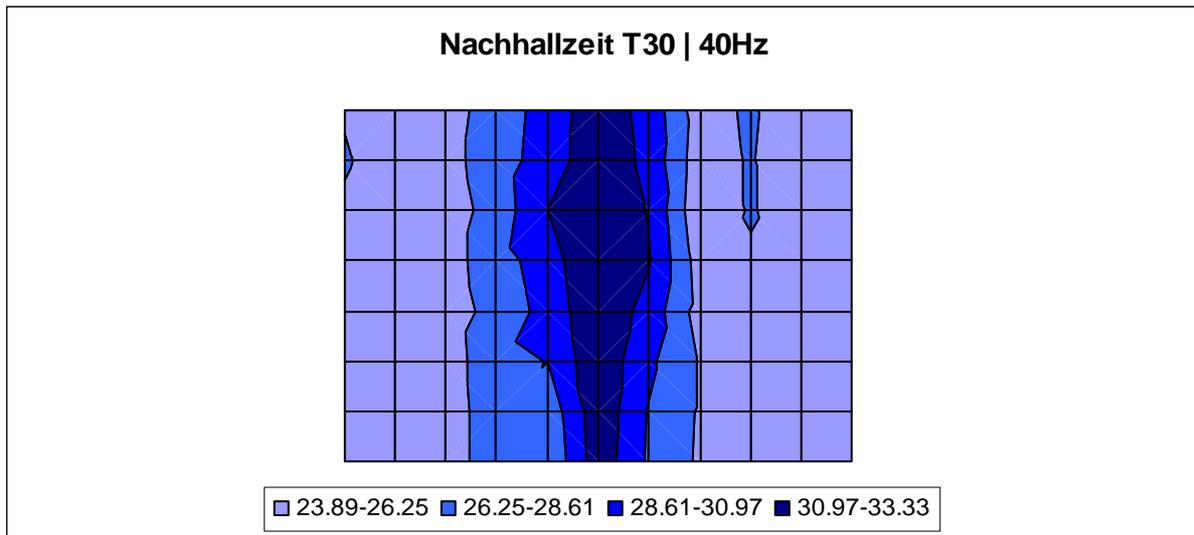
Grundsätzlich ist bei der Interpretation der 2D-Abbildungen vor allem auf die Skalierung in den einzelnen Diagrammen zu achten. Weiters wird darauf hingewiesen, dass das Raster der 2D-Diagramme nicht genau der Rasterung der Messung entspricht (vgl. Abbildung 1-3 und Abbildung 1-4). Dieser Umstand spielt aber keine wesentliche Rolle für die Interpretation und kann daher vernachlässigt werden.

Zunächst wird das Schallfeld im leeren Hallraum an Hand der 2D-Diagramme besprochen. Diese wurden aus der ersten Messung (vgl. Abbildung 1-3) gewonnen. Im nächsten Punkt werden dann die Ergebnisse aus der zweiten Messung (vgl. Abbildung 1-4) diskutiert. Zu jeder Frequenz werden jeweils zunächst die MLS-Messung und die Sweep-Messung untereinander abgebildet. Später wird auf diese Gegenüberstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Im Anhang sind natürlich alle Daten vorhanden.

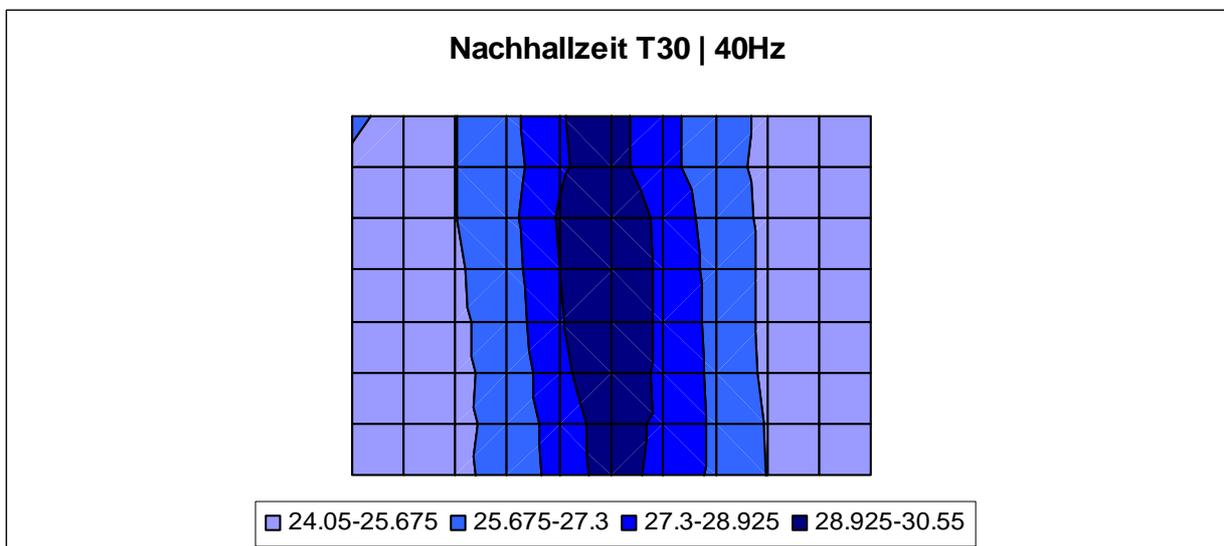
### 1.2.3.1 Die erste Messung – feste Position der Quelle ( $Q_0$ )

Wie schon erwähnt, wurden hier 88 Mikrofonpositionen gewählt und in drei verschiedenen Höhen gemessen. Das macht eine Summe von 264 Messpunkten, die jeweils mit der Sweep- und der MLS-Methode gemessen wurden. Die Quelle befand sich immer an der gleichen Stelle.

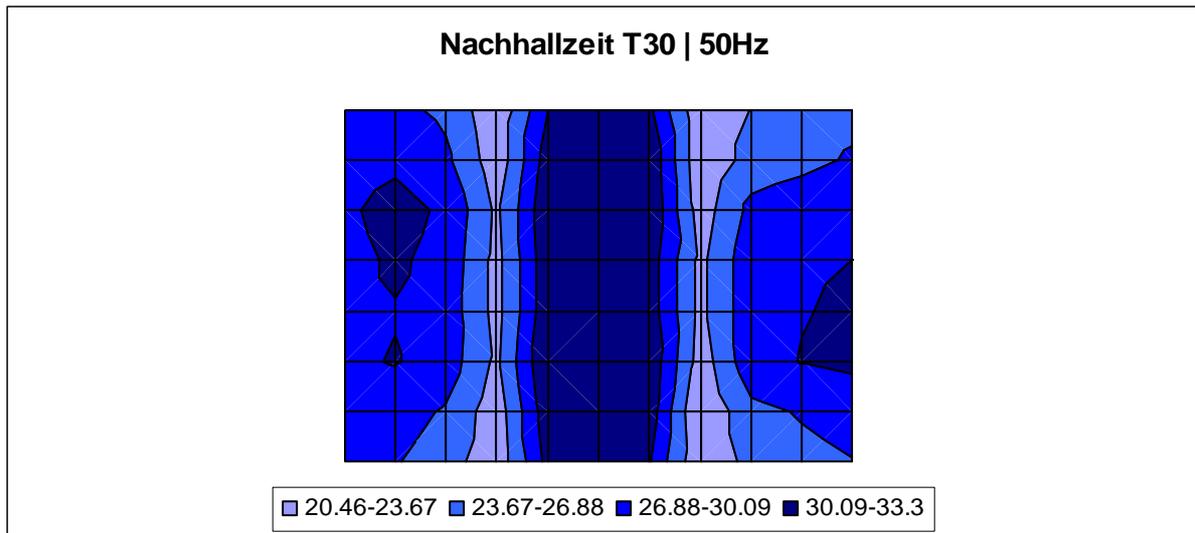
*Höhe der Mikrofone: 0,5m*



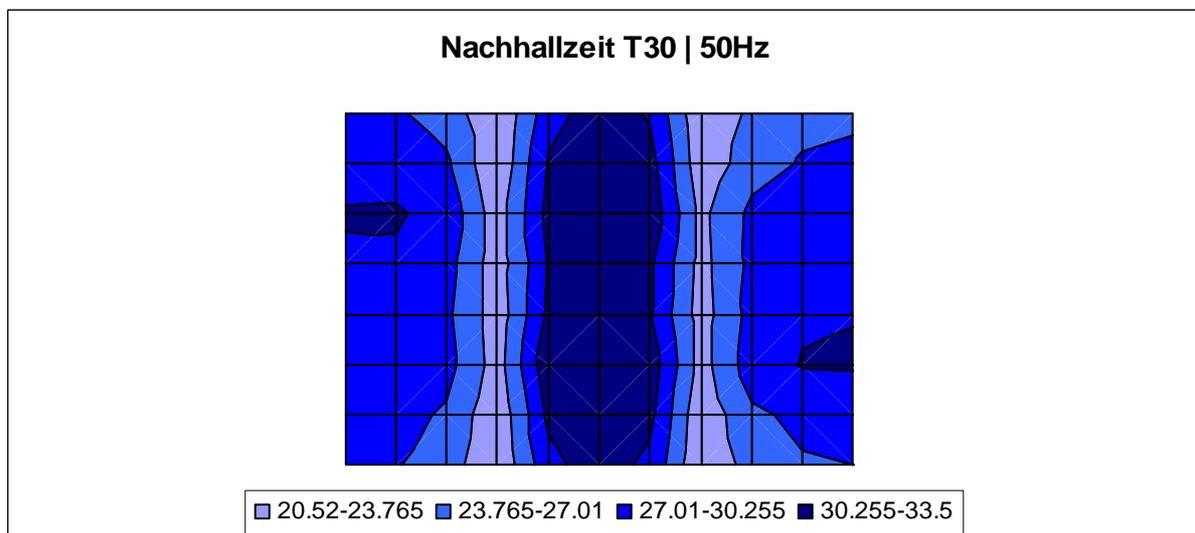
**Abbildung 1-14:** Messung mit MLS-Folge für 40Hz in 0,5m Höhe



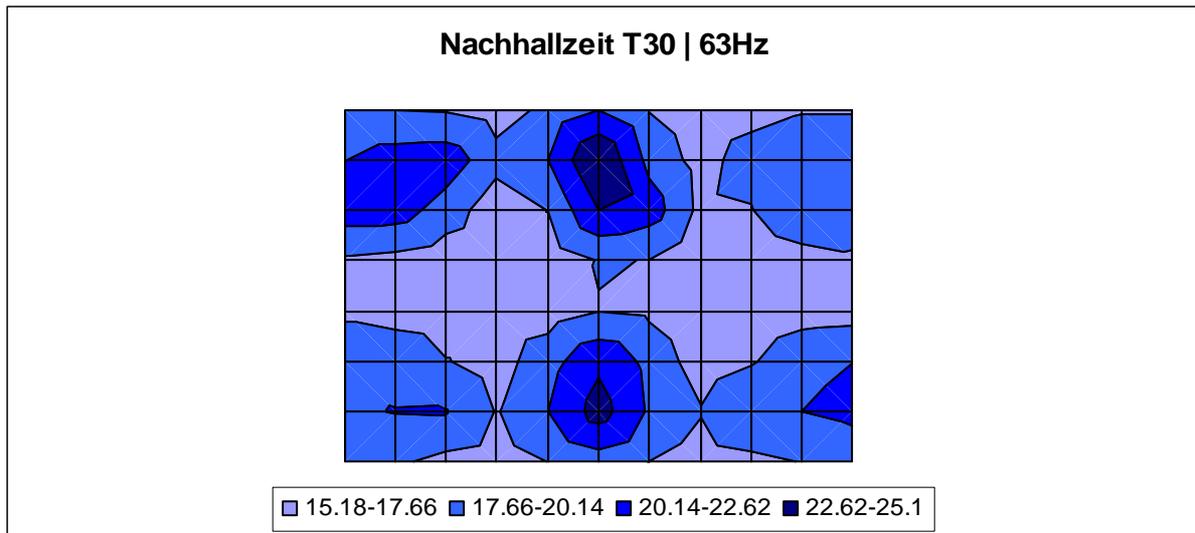
**Abbildung 1-15:** Messung mit Sinus-Sweep für 40Hz in 0,5m Höhe



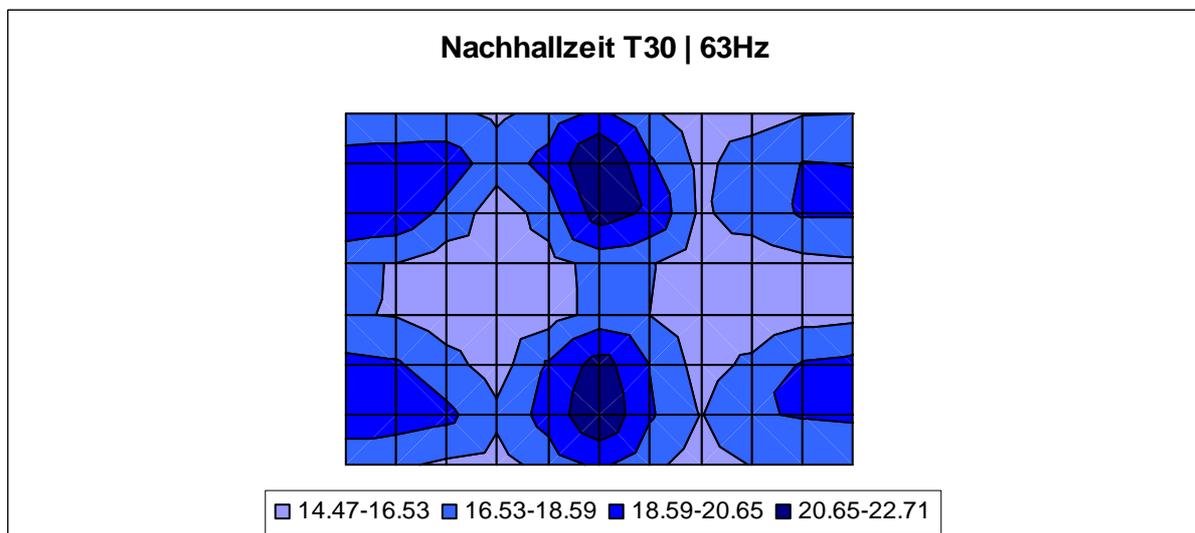
**Abbildung 1-16:** Messung mit MLS-Folge für 50Hz in 0,5m Höhe



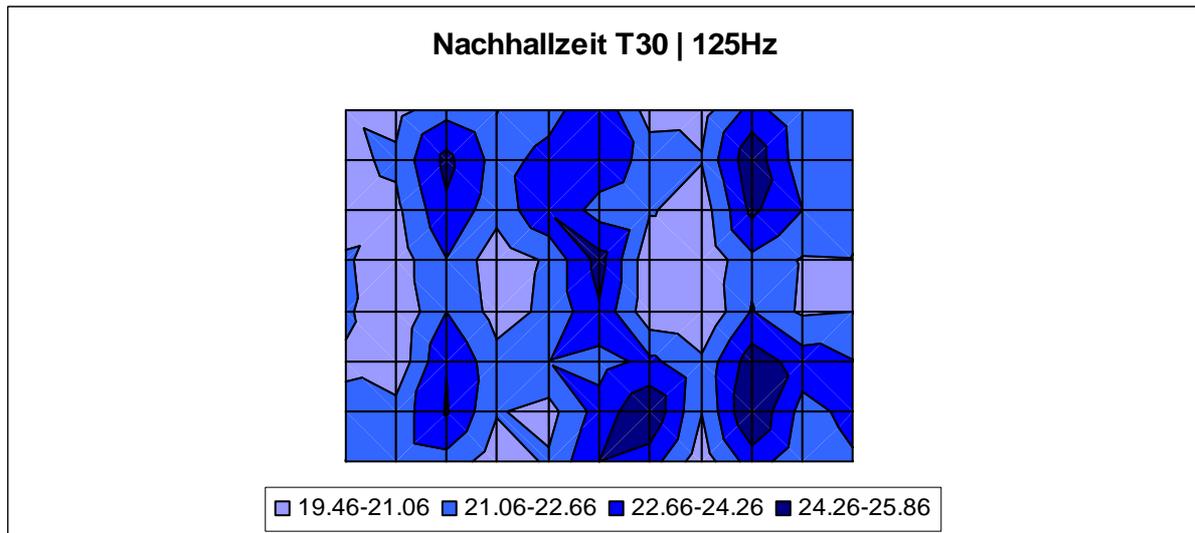
**Abbildung 1-17:** Messung mit Sinus-Sweep für 50Hz in 0,5m Höhe



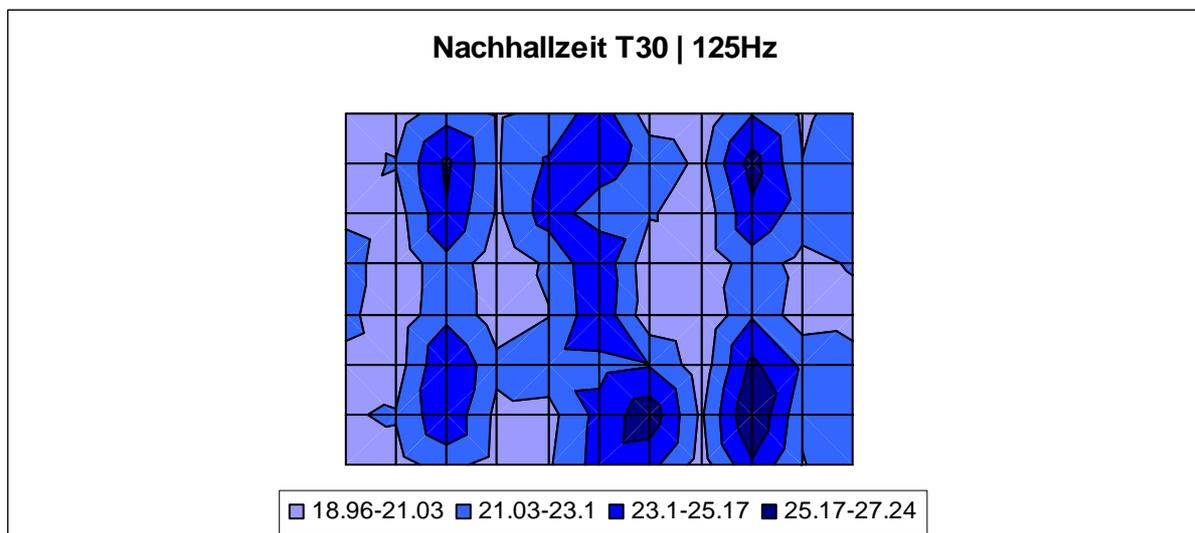
**Abbildung 1-18:** Messung mit MLS-Folge für 63Hz in 0,5m Höhe



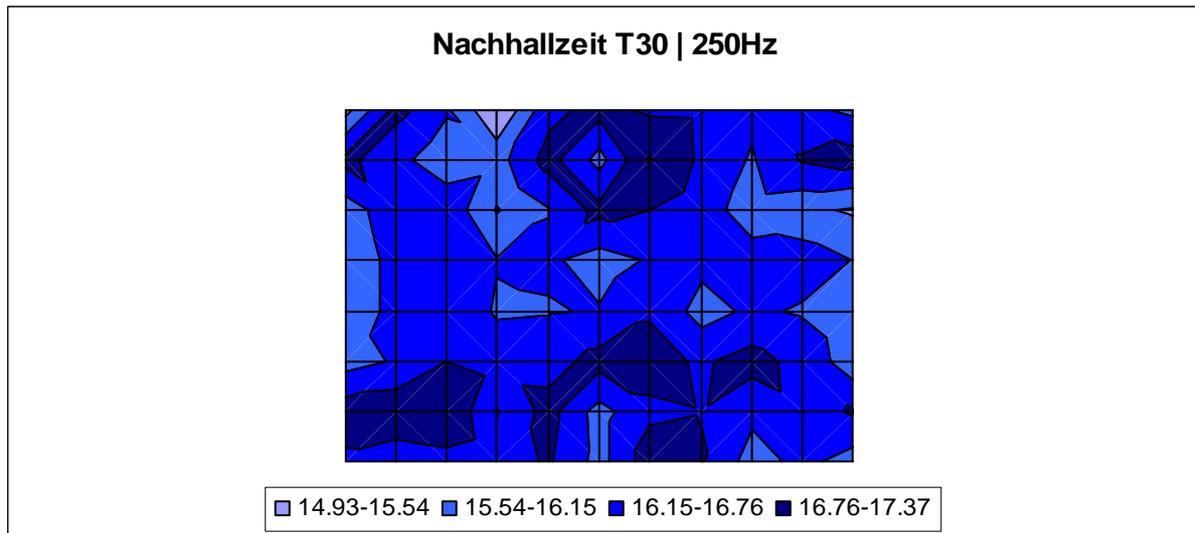
**Abbildung 1-19:** Messung mit Sinus-Sweep für 63Hz in 0,5m Höhe



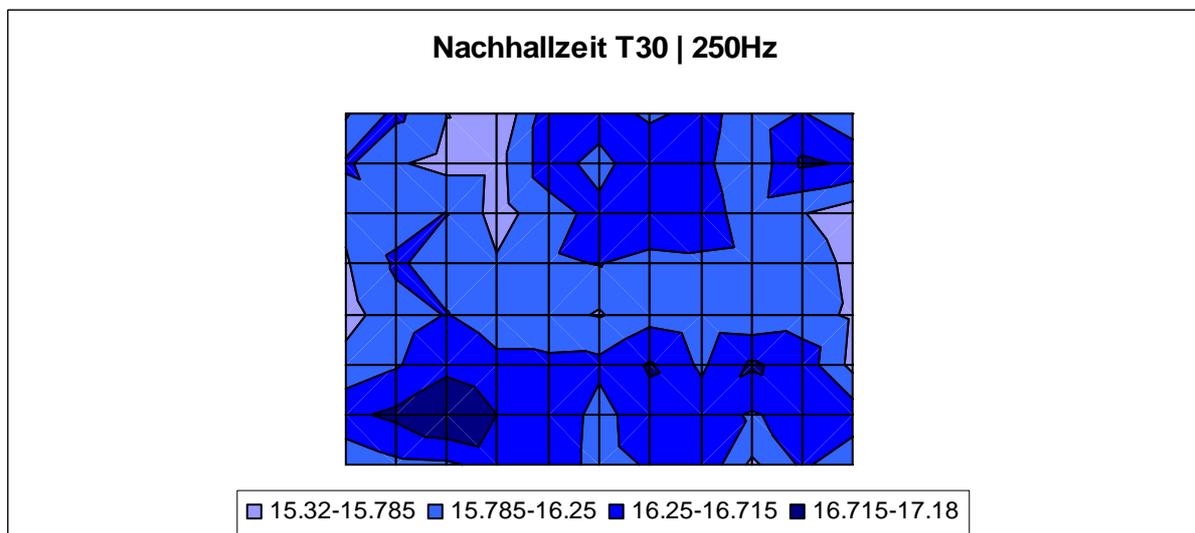
**Abbildung 1-20:** Messung mit MLS-Folge für 125Hz in 0,5m Höhe



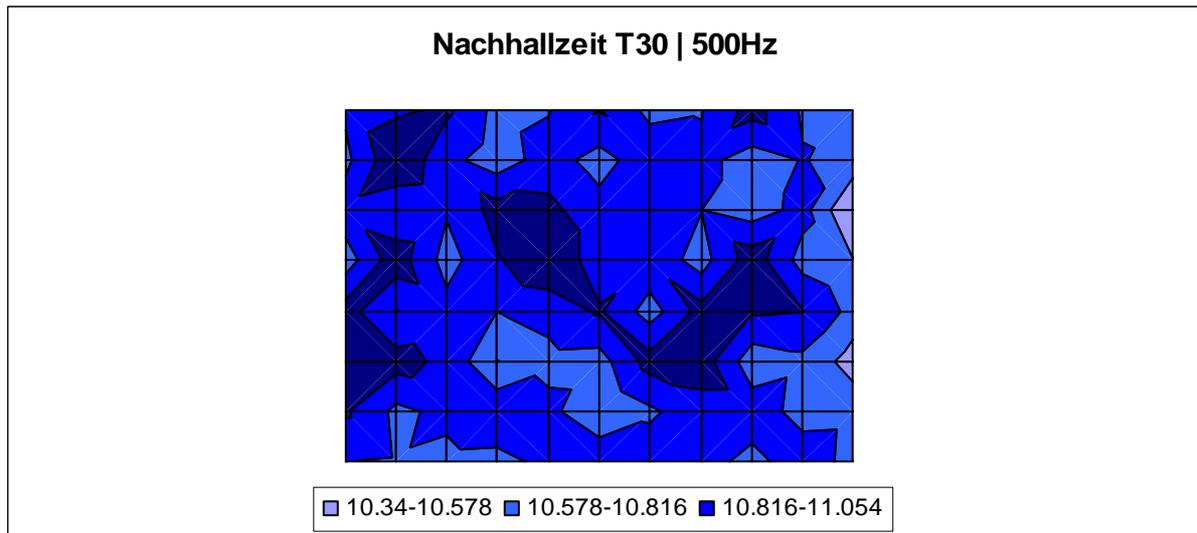
**Abbildung 1-21:** Messung mit Sinus-Sweep für 125Hz in 0,5m Höhe



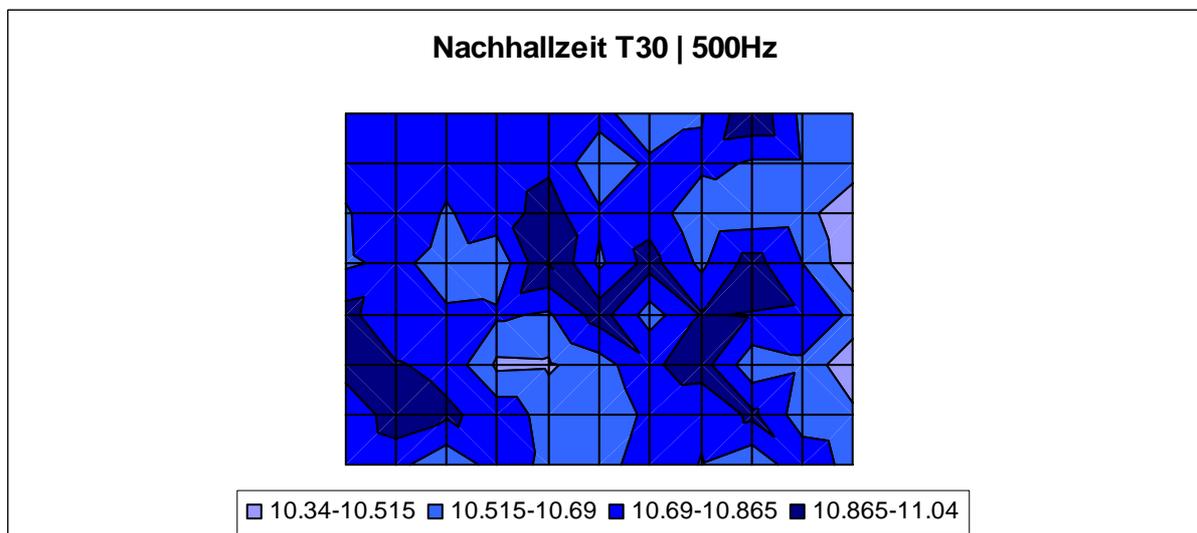
**Abbildung 1-22:** Messung mit MLS-Folge für 250 Hz in 0,5m Höhe



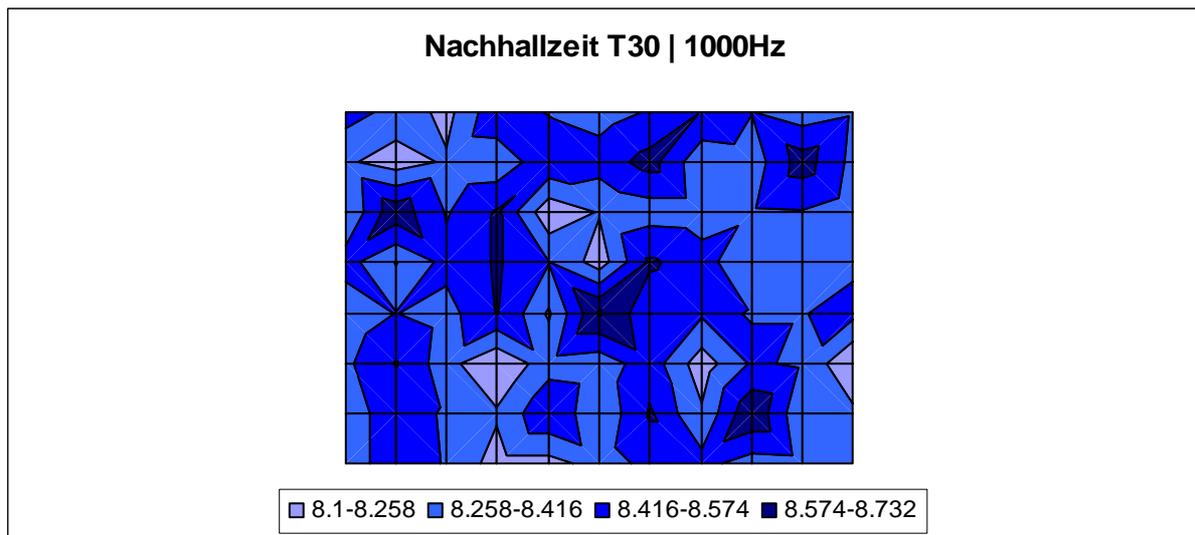
**Abbildung 1-23:** Messung mit Sinus-Sweep für 250Hz in 0,5m Höhe



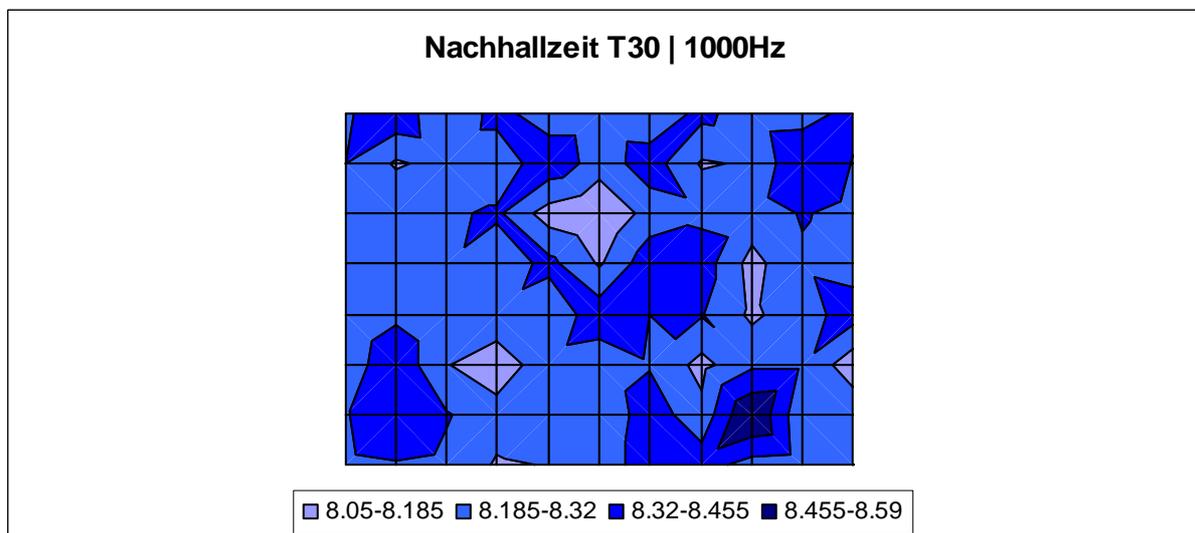
**Abbildung 1-24:** Messung mit MLS-Folge für 500Hz in 0,5m Höhe



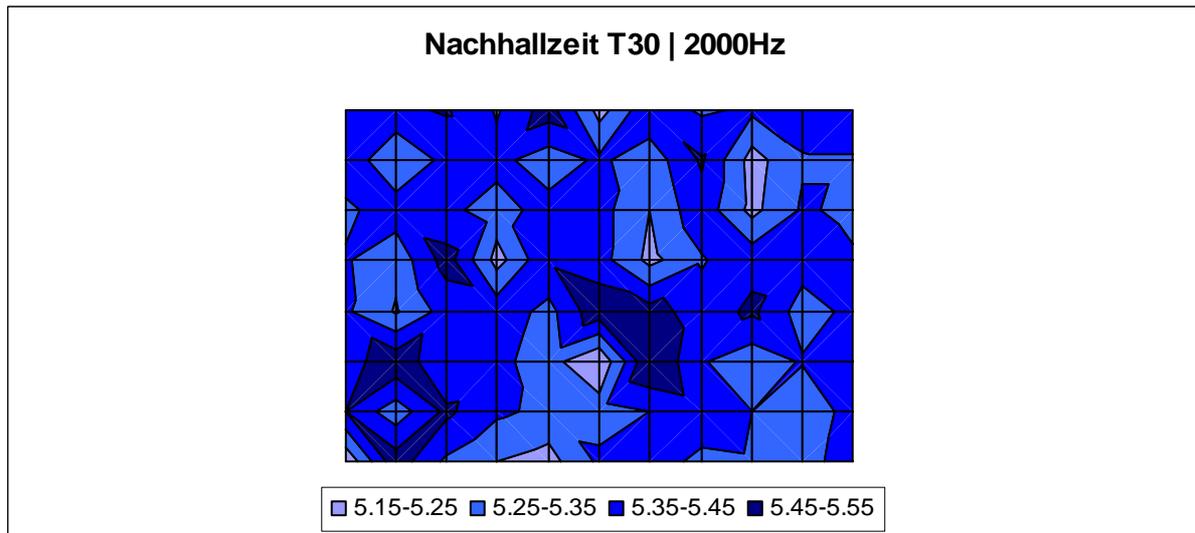
**Abbildung 1-25:** Messung mit Sinus-Sweep für 500Hz in 0,5m Höhe



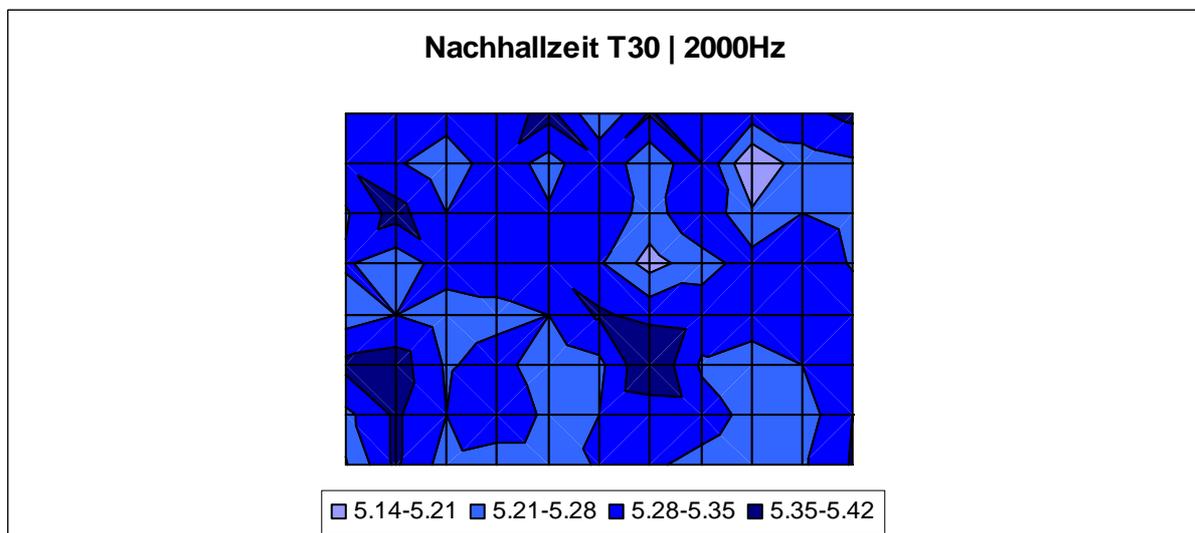
**Abbildung 1-26:** Messung mit MLS-Folge für 1kHz in 0,5m Höhe



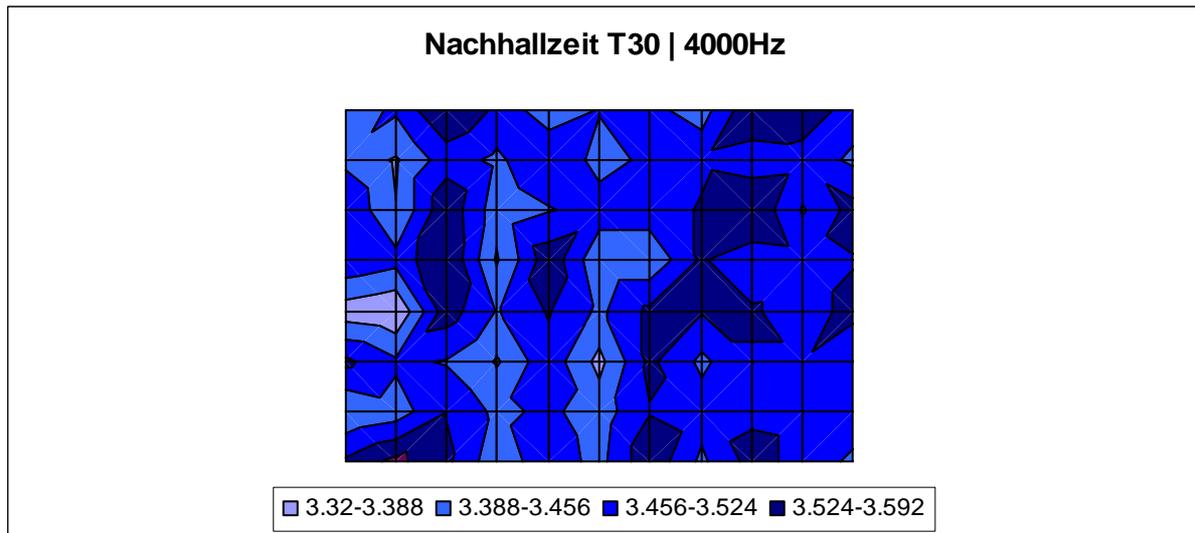
**Abbildung 1-27:** Messung mit Sinus-Sweep für 1kHz in 0,5m Höhe



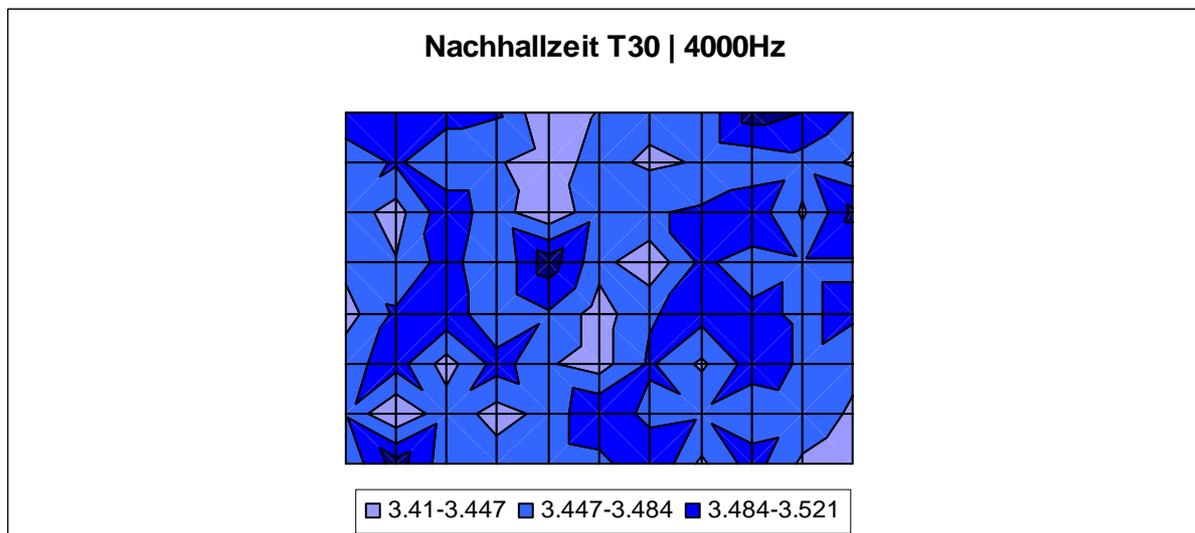
**Abbildung 1-28:** Messung mit MLS-Folge für 2kHz in 0,5m Höhe



**Abbildung 1-29:** Messung mit Sinus-Sweep für 2kHz in 0,5m Höhe



**Abbildung 1-30:** Messung mit MLS-Folge für 4kHz in 0,5m Höhe



**Abbildung 1-31:** Messung mit Sinus-Sweep für 4kHz in 0,5m Höhe

Gerade im tieffrequenten Bereich sind die Raummoden sehr deutlich zu erkennen. Ab einer Frequenz von 315Hz wird es immer schwieriger signifikante Formen des Hallschallfeldes auszumachen, und spätestens ab 1000Hz ist das Schallfeld so diffus, dass eine differenziertere Betrachtung im Grunde weder möglich noch sinnvoll erscheint. Hierzu sei auf die Legenden der einzelnen Abbildungen hingewiesen, an denen dieser Umstand auch festzustellen ist. Der Unterschied zwischen maximaler und minimaler Nachhallzeit beträgt beispielsweise bei 50Hz noch 12,84s, während der Unterschied bei einer Frequenz von 315Hz bei 1,57s und bei 2000Hz bei nur noch 0,4s liegt.

In Abbildung 1-32 ist für die Messhöhe 0,5m für die Sweep-Messung die prozentuale Abweichung der Nachhallzeit T30 vom Mittelwert dieser Messung dargestellt. Es zeigt sich, dass die Abweichung mit steigender Frequenz abnimmt. Dies ist auf die Modenbildung, die vor allem in tieferen Frequenzen signifikant ist, zurückzuführen.

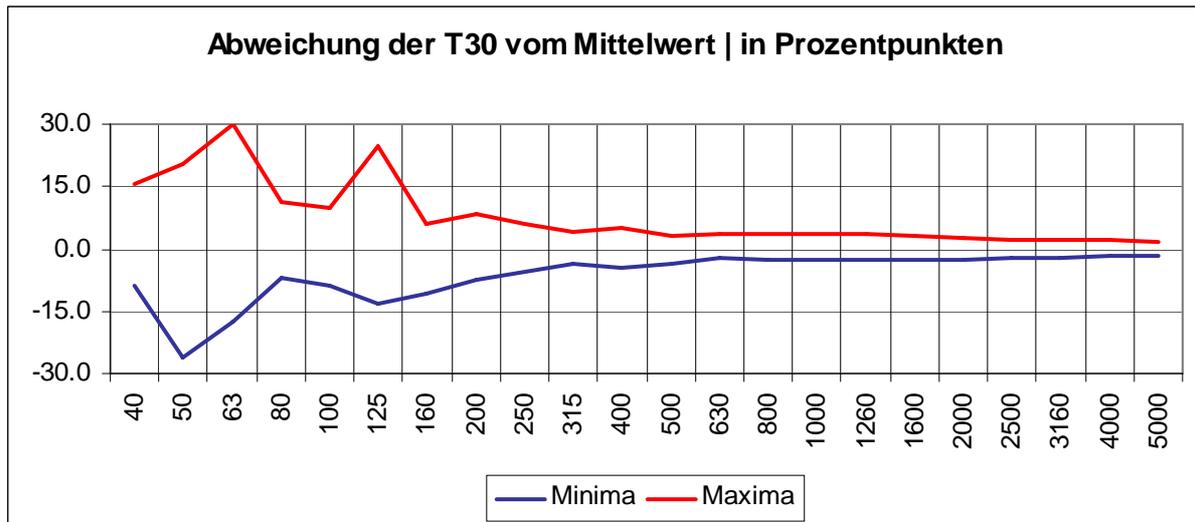


Abbildung 1-32: Abweichung der Nachhallzeit T30 vom Mittelwert in Prozentpunkten

In Tabelle 1.4 sind die Raummoden des Hallraums der TU Graz bis zu einer Frequenz von 100Hz angeführt. Diese Tabelle soll dazu dienen, die Eigenfrequenzen des Hallraums mit den Diagrammen der Messung zu vergleichen.

Die Raummoden bzw. die Eigenfrequenzen lassen sich aus der Raumgeometrie bestimmen.

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

**Formel 1.12:** Bestimmung der Eigenfrequenzen eines Raumes

Dabei sind  $f_R$  die Eigenfrequenzen des Raumes,  $c$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit,  $n_{x,y,z}$  sind die Ordnungszahlen,  $l_{x,y,z}$  sind die Raumdimensionen.

Raummoden unter 100Hz											
$n_x$	$n_y$	$n_z$	$f_R$ in [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$f_R$ in [Hz]	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$f_R$ in [Hz]
1	0	0	20.6	0	2	1	67.3	0	3	0	86.1
0	1	0	28.7	3	1	0	68.2	2	1	2	86.3
0	0	1	35.1	0	0	2	70.2	4	1	0	87.3
1	1	0	35.4	1	2	1	70.4	1	3	0	88.6
1	0	1	40.7	2	2	0	70.7	4	0	1	89.7
2	0	0	41.2	3	0	1	71.1	0	2	2	90.7
0	1	1	45.4	1	0	2	73.2	3	2	1	91.4
1	1	1	49.8	0	1	2	75.8	0	3	1	93.0
2	1	0	50.3	3	1	1	76.7	1	2	2	93.0
2	0	1	54.2	1	1	2	78.6	3	0	2	93.6
0	2	0	57.4	2	2	1	78.9	4	1	1	94.1
1	2	0	61.0	2	0	2	81.4	1	3	1	95.3
2	1	1	61.3	4	0	0	82.5	2	3	0	95.5
3	0	0	61.9	3	2	0	84.4	3	1	2	97.9

**Tabelle 1.4:** Die Raummoden im Hallraum der TU Graz

Die Eigenfrequenzen treten nur bei relativ niedrigen Frequenzen getrennt in Erscheinung. Mit steigender Frequenz wächst ihre Dichte längs der Frequenzachse quadratisch an, so dass sich die ihnen zugeordneten Resonanzkurven mehr und mehr überlagern. Die Bedingung für praktisch vollständige Überlagerung lautet:

$$\frac{Vf^2}{T} > 4 \cdot 10^6 \left( \frac{m}{s} \right)^3$$

**Formel 1.13:** Bedingung für vollständige Überlagerung der Resonanzkurven von Eigenfrequenzen

$f$  ist die Frequenz,  $V$  ist das Volumen und  $T$  die Nachhallzeit. Die entsprechende Grenzfrequenz

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

**Formel 1.14:** Schroeder-Frequenz

wird oft als „Großraumfrequenz“ oder als „Schroeder-Frequenz“ bezeichnet<sup>14</sup>. Die Zahl der unter  $f_s$  liegenden, d. h. der überhaupt einigermaßen trennbaren Eigenfrequenzen beträgt

$$N_E(f < f_s) = 850 \sqrt{\frac{T^3}{V}}$$

**Formel 1.15:** Anzahl der Eigenfrequenzen unterhalb der Schroeder-Frequenz

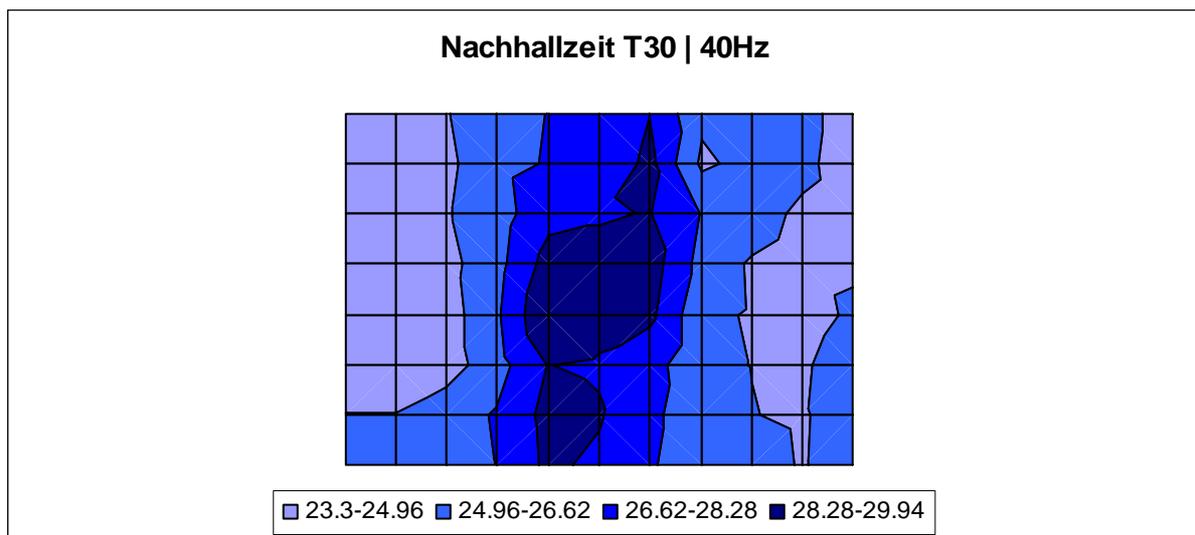
<sup>14</sup> vgl. [MÜLLER]

$N_E$  ist dabei die Anzahl der Eigenfrequenzen und  $f_s$  die *Schroeder*-Frequenz. Bei einem Volumen von  $244,79\text{m}^3$  und einer durchschnittlichen Nachhallzeit von  $14,43\text{s}$  (gemittelt über alle Frequenzen und alle Messpunkte der Höhe  $0,5\text{m}$  der MLS-Messung) beträgt die Schroeder-Frequenz für den Hallraum der TU Graz  $f_s=458,6\text{Hz}$ . Die Anzahl der Eigenfrequenzen liegt bei  $2977$ .

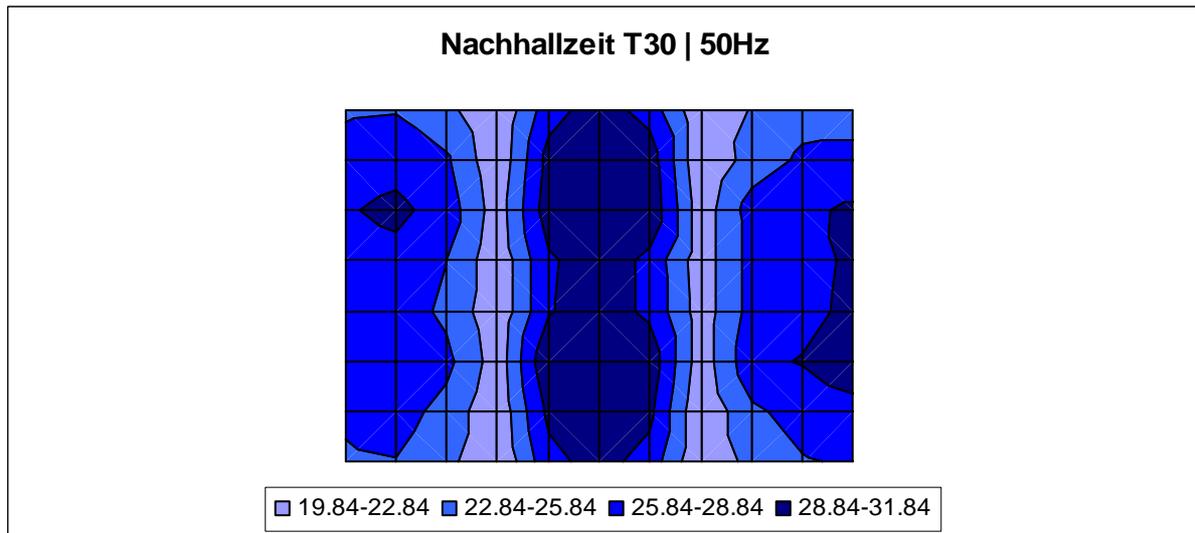
Oberhalb der *Schroeder*-Frequenz ändert sich der Schalldruck bei einer Variation der Schallfrequenz oder des Empfangsorts in quasi-stochastischer Weise. Die *Schroeder*-Frequenz  $f_s$  und die eingangs erwähnte untere Grenzfrequenz  $f_g$  (nach *Meyer* und *Kuttruff*, vgl. Formel 1.4 in Kapitel 1.1.1.1) liefern verschiedene Ergebnisse, was nicht verwundert, bedenkt man, dass  $f_g$  ein mehr oder weniger empirisch ermittelter Wert ist und  $f_s$  auf der Theorie der Raummoden basiert.

### **Höhe der Mikrofone: 1,2m**

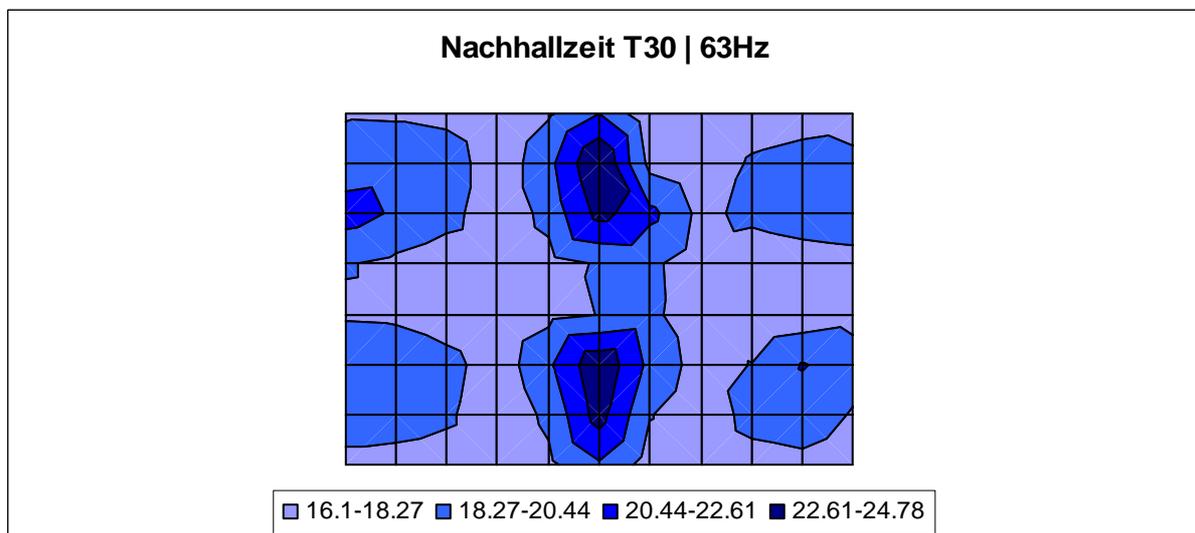
Zur besseren Übersicht werden für die Höhen  $1,2\text{m}$  und  $2,0\text{m}$  die MLS- und Sweep-Messungen nicht mehr gegenübergestellt. Für  $1,2\text{m}$  werden die Ergebnisse der MLS-Messungen gezeigt, für  $2,0\text{m}$  werden die Ergebnisse, die durch Messung mittels Sinus-Sweep erhalten wurden, dargestellt.



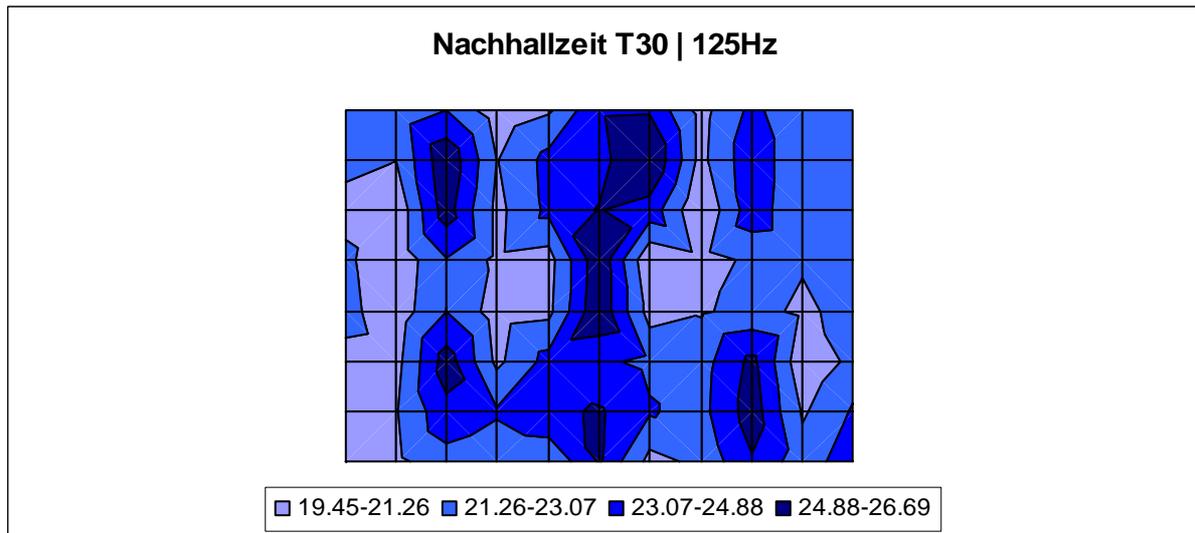
**Abbildung 1-33:** Messung mit MLS-Folge für  $40\text{Hz}$  in  $1,2\text{m}$  Höhe



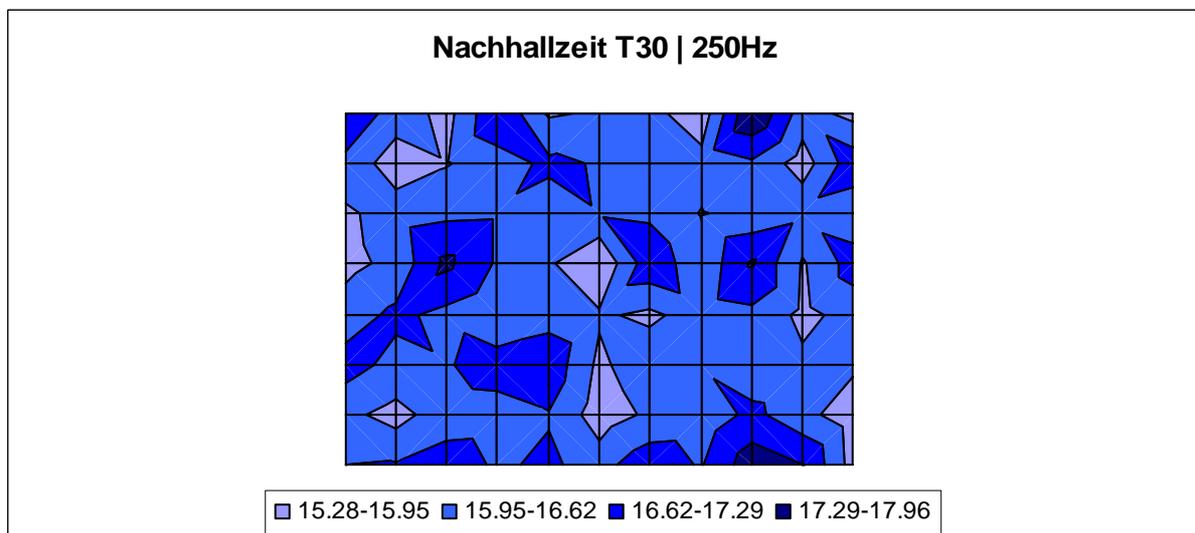
**Abbildung 1-34:** Messung mit MLS-Folge für 50Hz in 1,2m Höhe



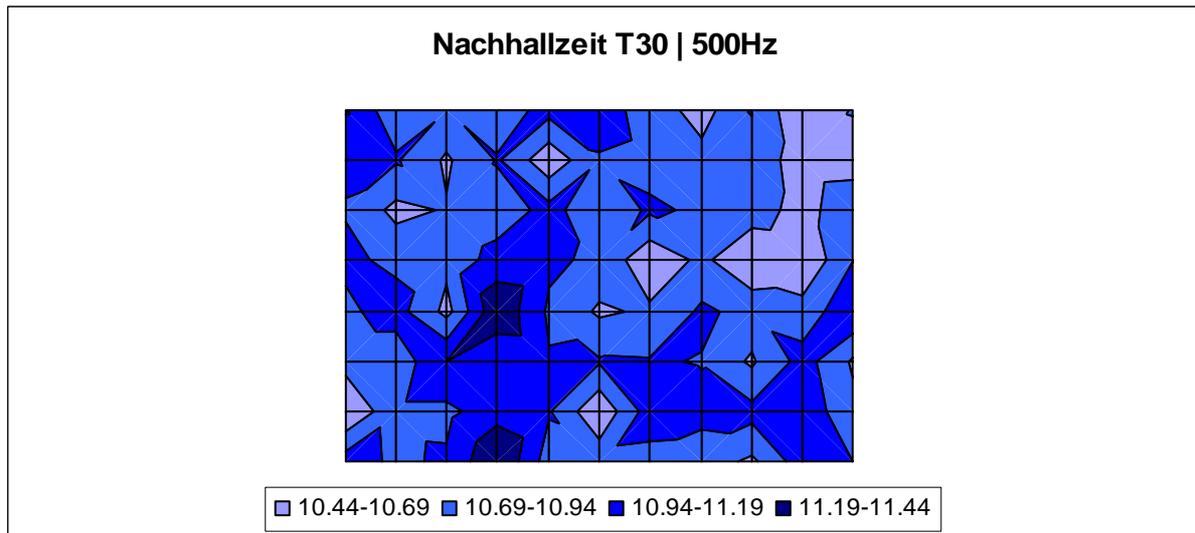
**Abbildung 1-35:** Messung mit MLS-Folge für 63Hz in 1,2m Höhe



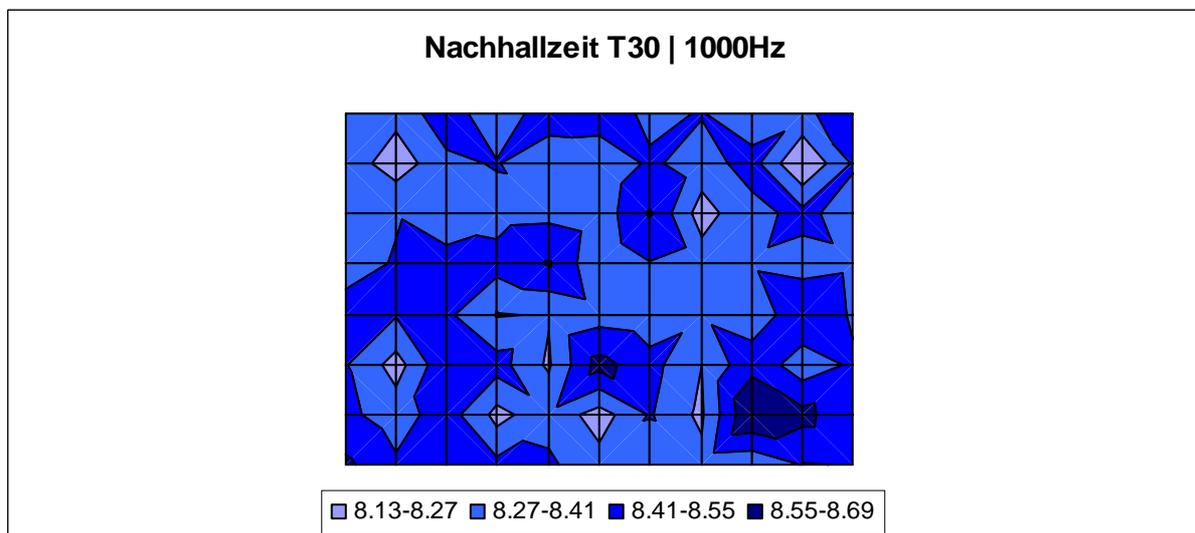
**Abbildung 1-36:** Messung mit MLS-Folge für 125Hz in 1,2m Höhe



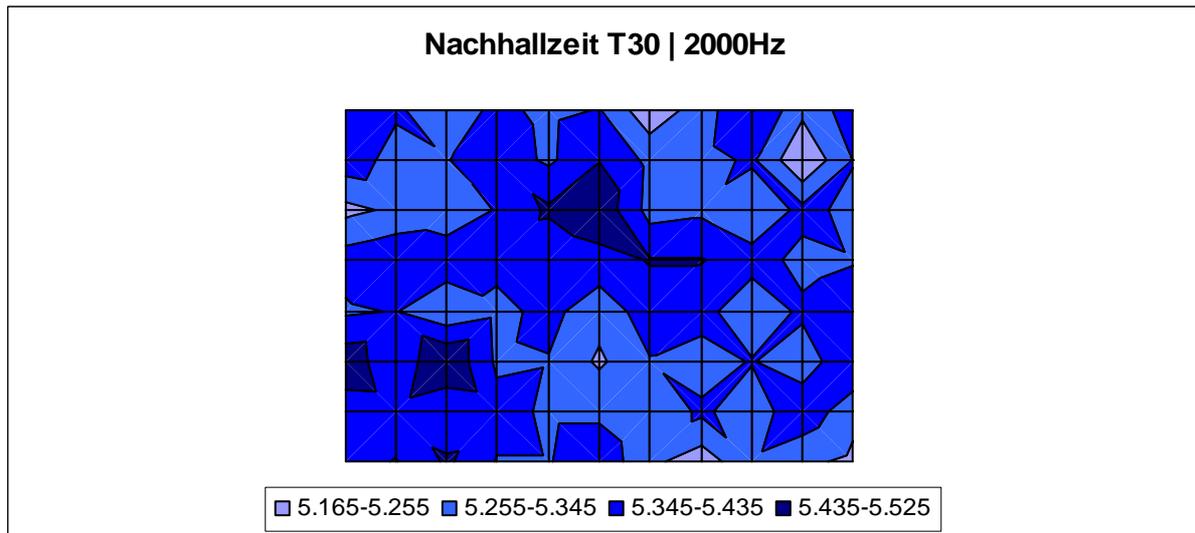
**Abbildung 1-37:** Messung mit MLS-Folge für 250Hz in 1,2m Höhe



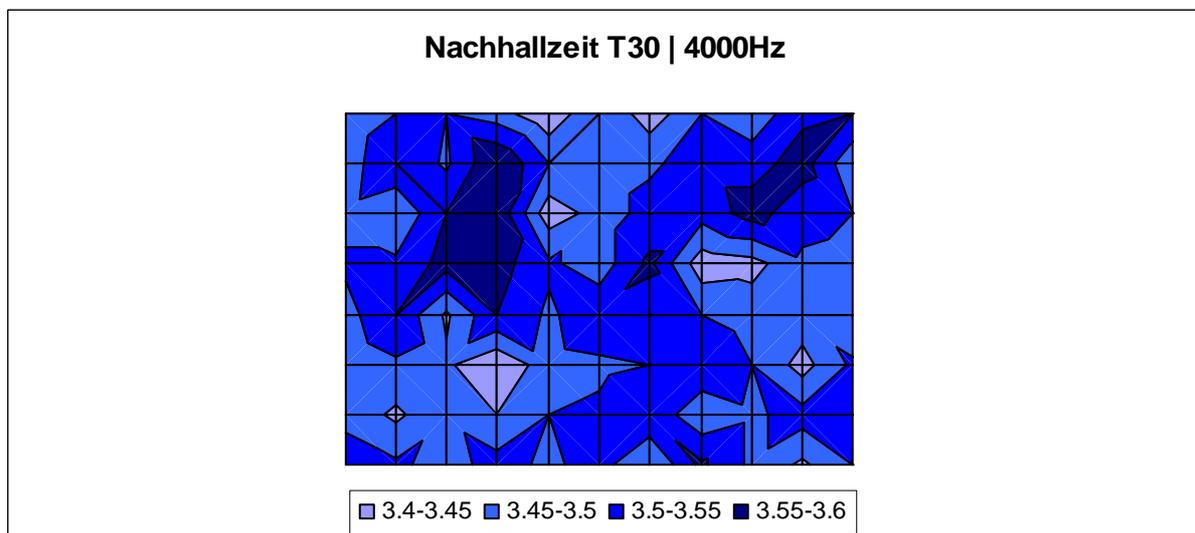
**Abbildung 1-38:** Messung mit MLS-Folge für 500Hz in 1,2m Höhe



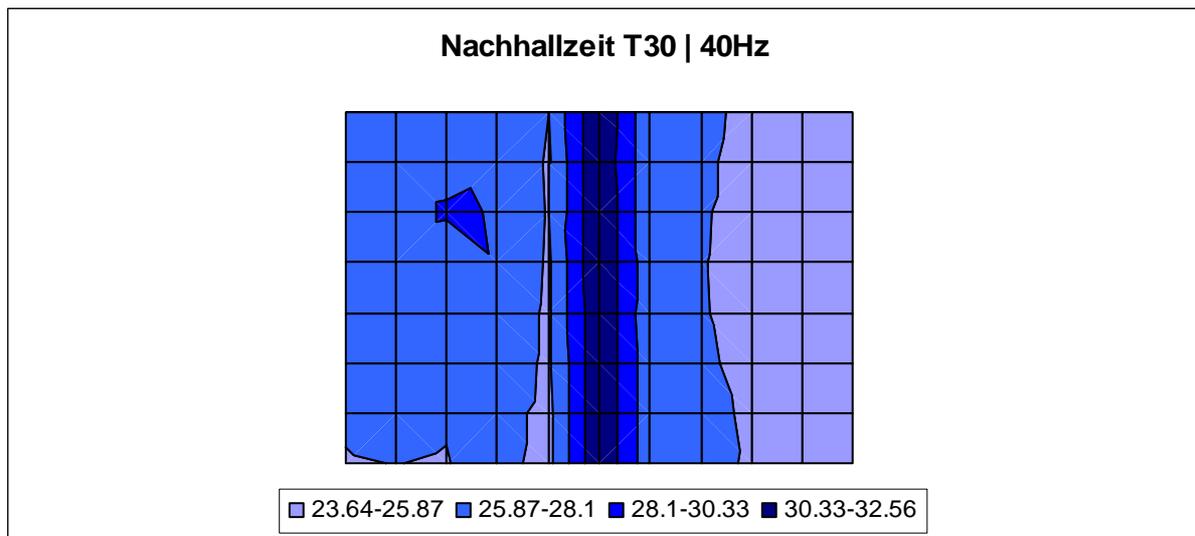
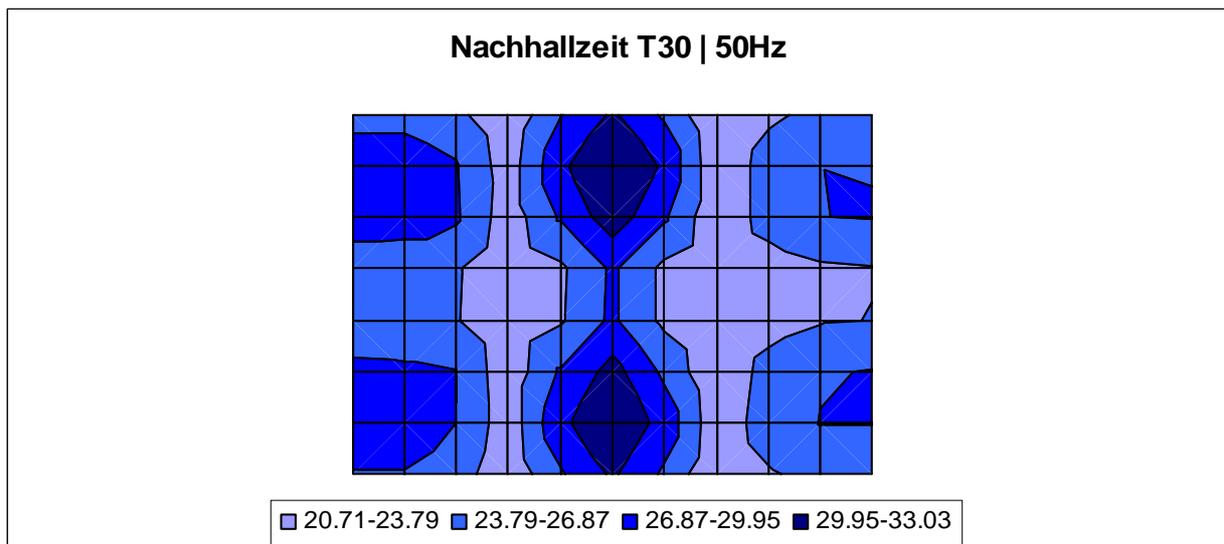
**Abbildung 1-39:** Messung mit MLS-Folge für 1kHz in 1,2m Höhe

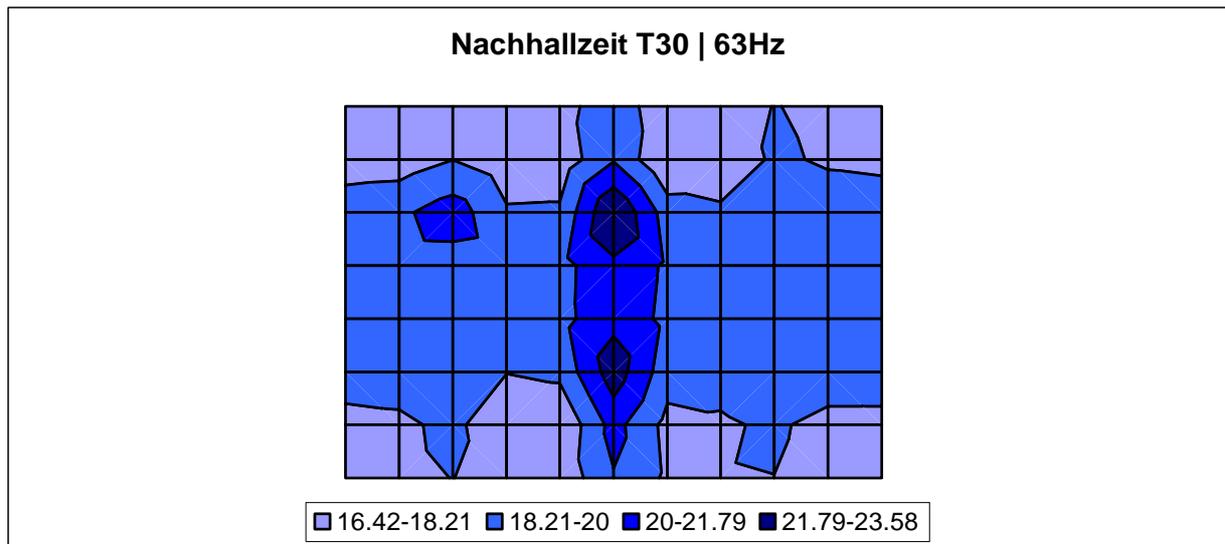


**Abbildung 1-40:** Messung mit MLS-Folge für 2kHz in 1,2m Höhe

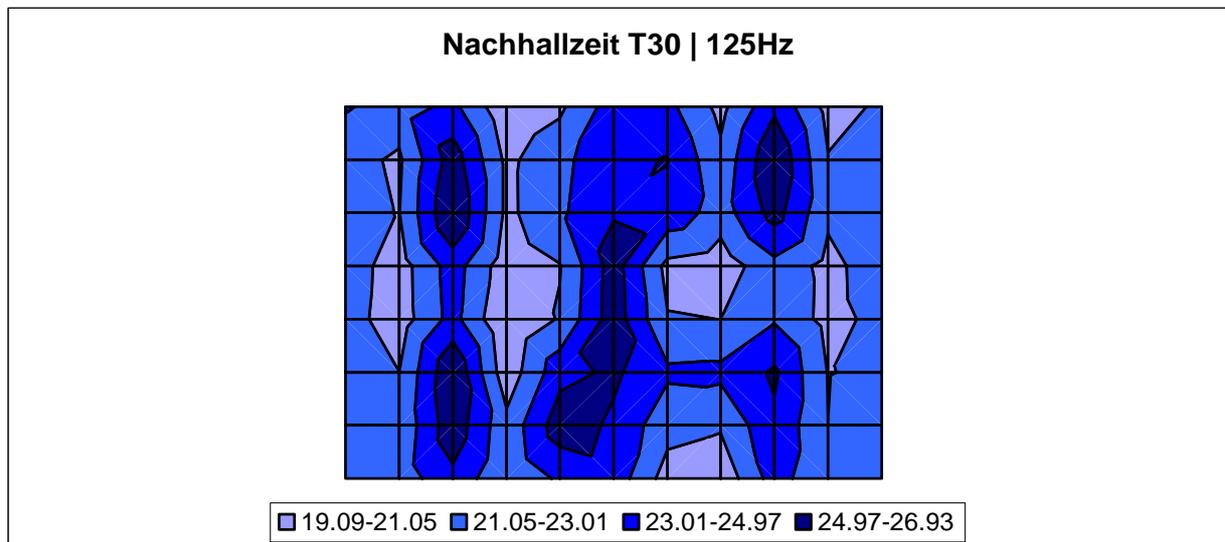


**Abbildung 1-41:** Messung mit MLS-Folge für 4kHz in 1,2m Höhe

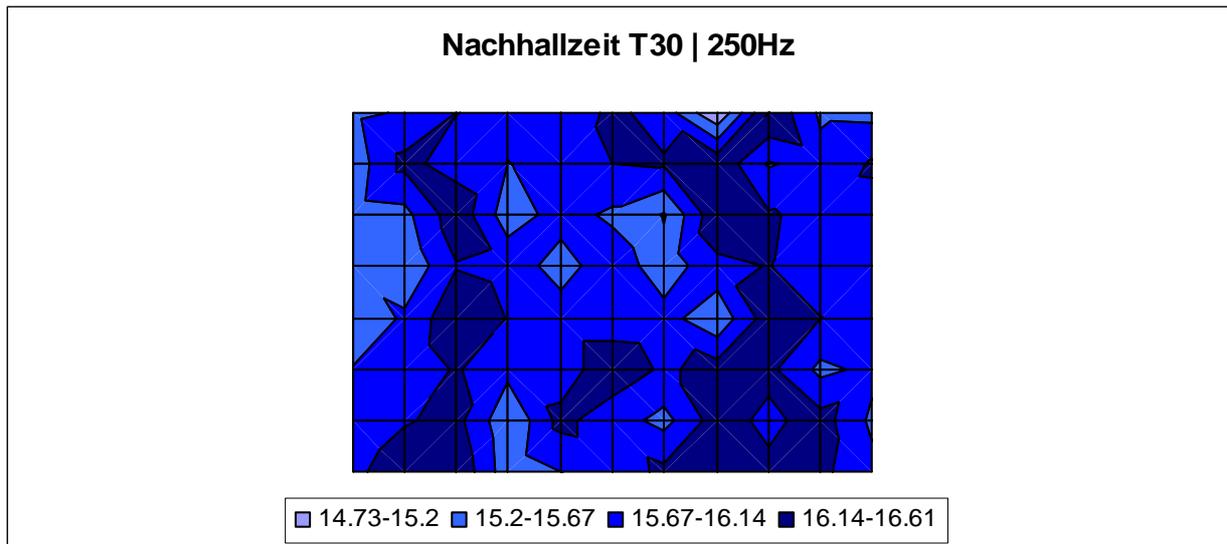
**Höhe der Mikrofone: 2,0m****Abbildung 1-42:** Messung mit Sinus-Sweep für 40Hz in 2,0m Höhe**Abbildung 1-43:** Messung mit Sinus-Sweep für 50Hz in 2,0m Höhe



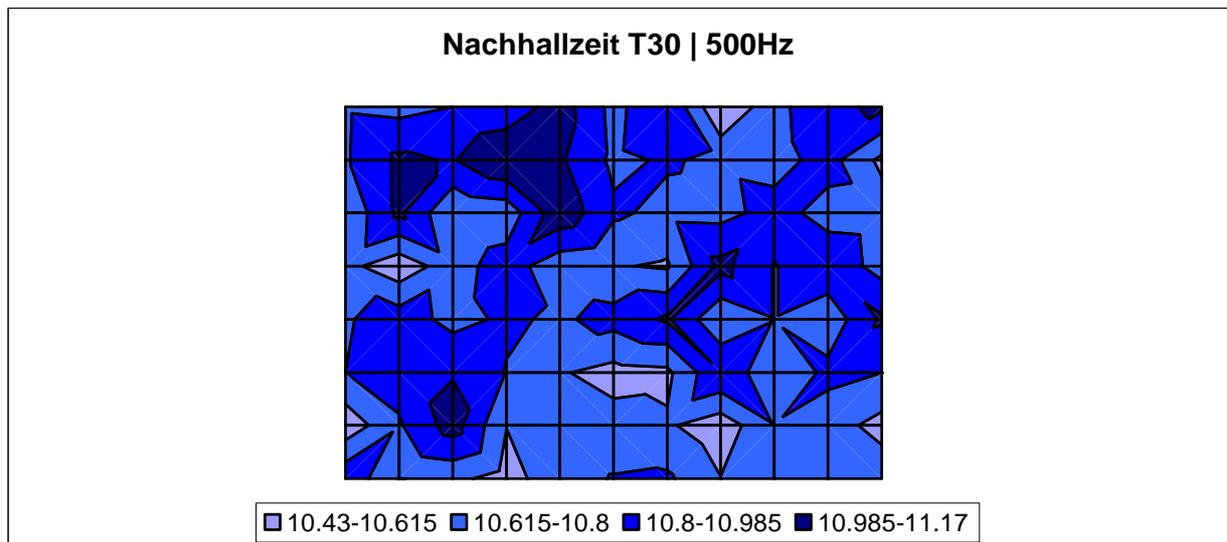
**Abbildung 1-44:** Messung mit Sinus-Sweep für 63Hz in 2,0m Höhe



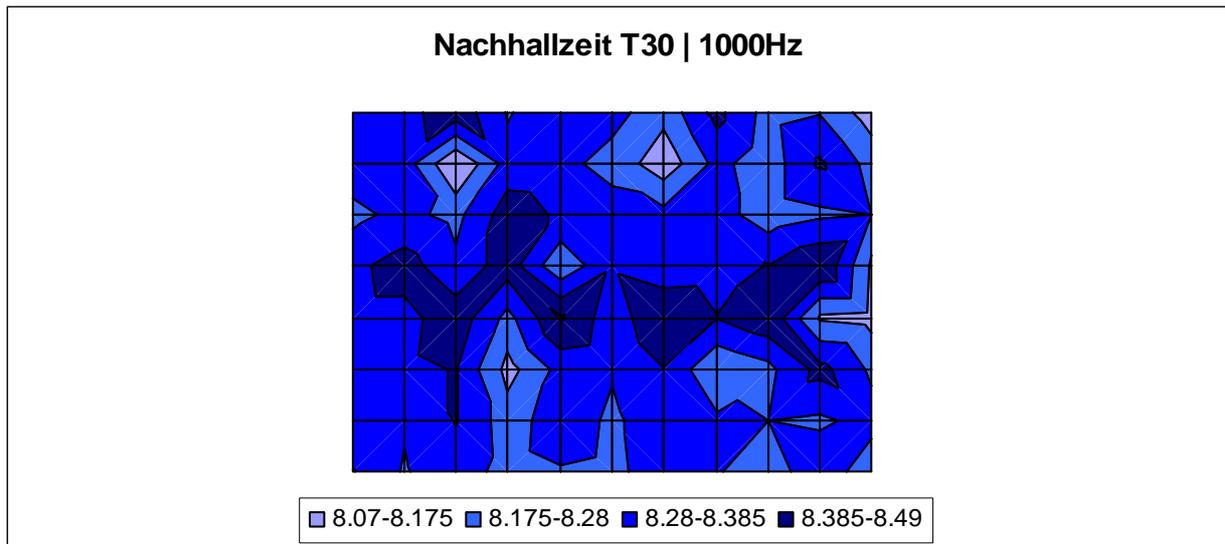
**Abbildung 1-45:** Messung mit Sinus-Sweep für 125Hz in 2,0m Höhe



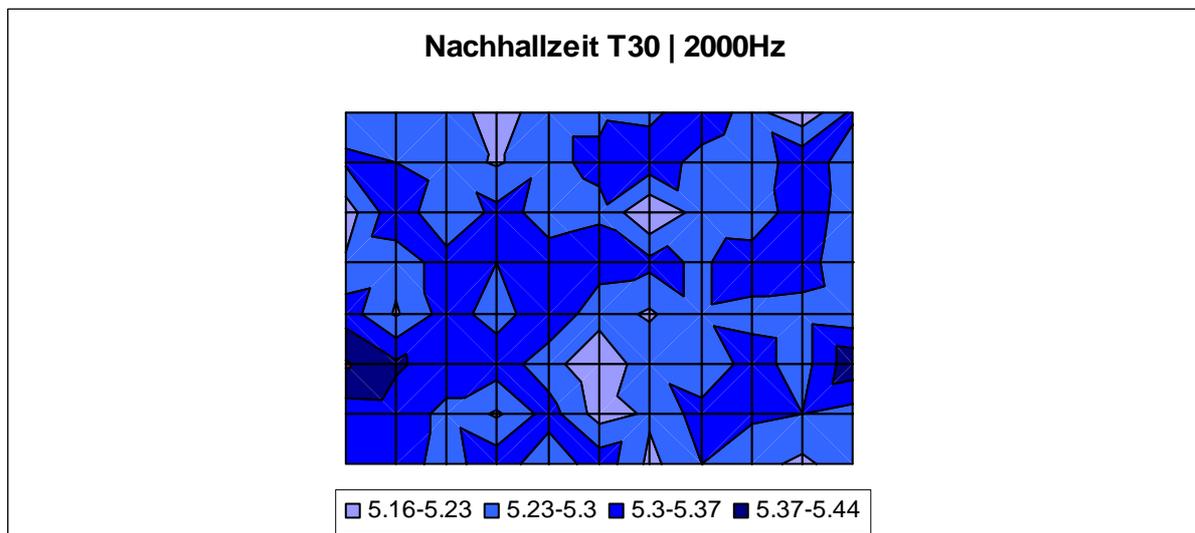
**Abbildung 1-46:** Messung mit Sinus-Sweep für 250Hz in 2,0m Höhe



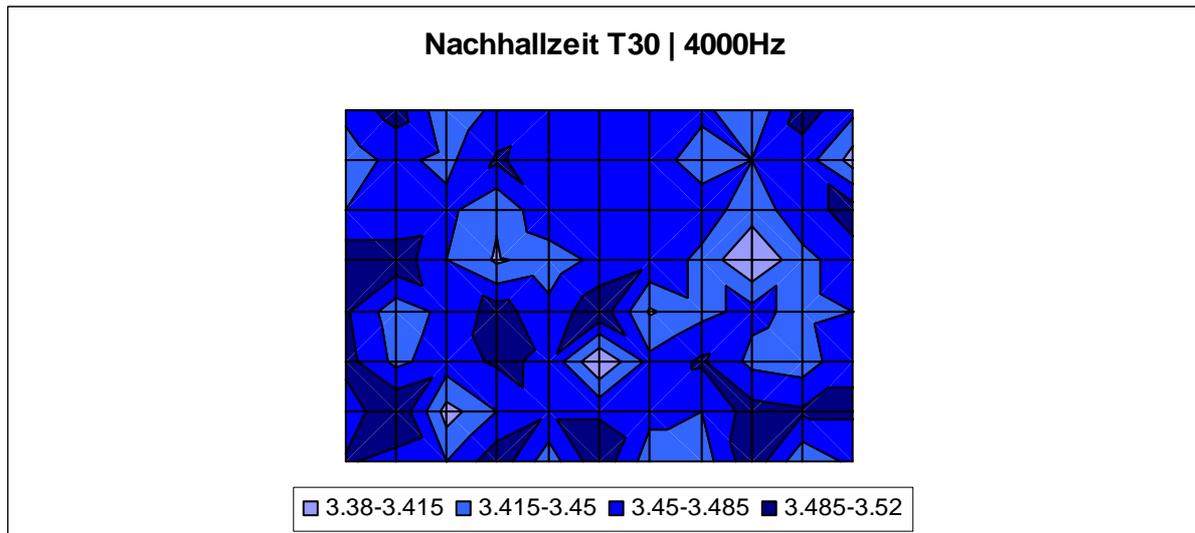
**Abbildung 1-47:** Messung mit Sinus-Sweep für 500Hz in 2,0m Höhe



**Abbildung 1-48:** Messung mit Sinus-Sweep für 1kHz in 2,0m Höhe



**Abbildung 1-49:** Messung mit Sinus-Sweep für 2kHz in 2,0m Höhe



**Abbildung 1-50:** Messung mit Sinus-Sweep für 4kHz in 2,0m Höhe

Vergleicht man die Diagramme der drei verschiedenen Messhöhen für die Frequenz 40Hz, so ist festzustellen, dass sich eine Zone in der Mitte des Hallraums (parallel zur „Breite“, also zu den kürzeren Seitenwänden) ausbildet, in der es zu wesentlich höheren Messergebnissen kommt als zu den seitlichen Raumbegrenzungen hin der Fall ist. Wirft man auch noch einen Blick auf Tabelle 1.4, so ist leicht zu erkennen, dass die Raummoden mit den Ordnungszahlen 1-0-1 (mit der Frequenz 40,7Hz) und 2-0-0 (mit der Frequenz 41,2Hz) sehr nah zusammen liegen. Da die axialen Moden, also jene, die sich entlang einer Achse des Raumes ausbilden (daran zu erkennen, dass in der Ordnungszahl immer zwei Nullen auftreten), wesentlich stärkere Ausprägung haben, ist hier mit Sicherheit der Modus mit der Ordnungszahl 2-0-0 zu sehen. Ein Unterschied in den verschiedenen Höhen wird am deutlichsten bei der Höhe 2,0m. Hier ist die Zone mit sehr großer Nachhallzeit etwas schmaler als in den beiden anderen Höhen, was mit dem steigenden Einfluss der Segelflächen bei größeren Höhen zu erklären ist.

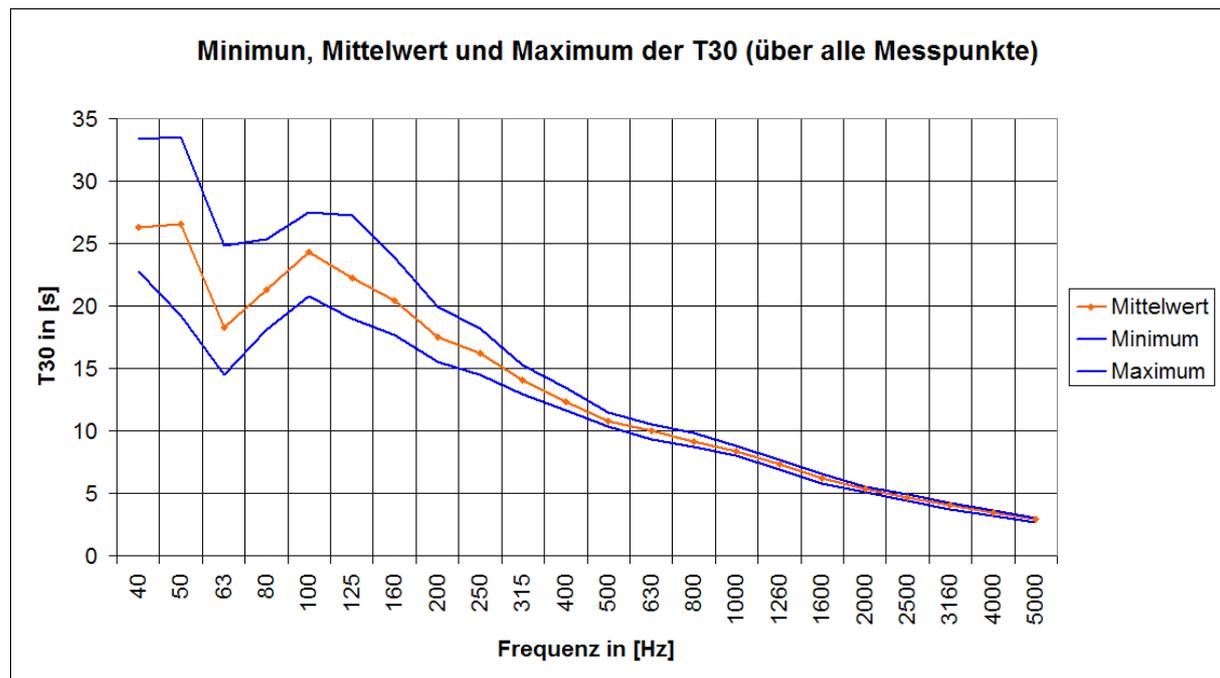
Für 50Hz sieht man bei 0,5m und 1,2m zwei weitere Zonen an den seitlichen Begrenzungsflächen, an denen man größere Messergebnisse zu erwarten hat. Für die Höhe 2,0m sind hier schon sechs Zonen mit großen Nachhallzeiten zu erkennen, was für 63Hz bei den beiden tieferen Messebenen deutlich wird. Bei dieser Frequenz ist dieses Muster in einer Höhe von 2,0m schon wieder verschwunden, mit dem gleichen Grund der besseren Wirksamkeit der Segelflächen.

Zwei Zonen in der Mitte des Hallraums mit hohen Nachhallzeiten bleiben auch weiterhin für eine Frequenz von 125Hz. Die Höhe der Messpunkte wirkt sich hier lediglich auf die Breite dieser Zonen aus. Die vier anderen Zonen, die sich zuvor noch direkt an den Seitenwänden des Hallraums befunden haben, rücken nun etwas näher zu Mitte.

In den Diagrammen für 250Hz vermisst man nun schon die Gleichartigkeit des Schallfeldes im Vergleich zu den Messungen bei tieferen Frequenzen. Auch eine Abhängigkeit von der Messhöhe ist schwer auszumachen. Das gleiche gilt für die Messungen bei 500Hz. Wirkliche Gemeinsamkeiten zu erkennen, ist spätestens ab jetzt nicht mehr möglich. Betrachtet man jedoch die Legenden der Diagramme genauer, so verwundert dies nicht weiter, da der Unterschied zwischen maximaler und minimaler Nachhallzeit sehr klein wird (beispielsweise in der Messung in 0,5m Höhe mit der Sinus-Sweep-Methode, vgl. Abbildung 1-25, liegen die Nachhallzeiten in einem Bereich von 10,34s bis 11,04s). Eine Abhängigkeit der Messergebnisse

von der Messhöhe ist auch nicht mehr gegeben, vergleicht man die minimalen und maximalen Werte für die drei verschiedenen Höhen.

Nachdem nun die Beschaffenheit des Schallfeldes im Hallraum durch die dargestellten Diagramme diskutiert wurde und genau bekannt ist, besteht die Möglichkeit verschiedene Zonen zu bestimmen, in denen die zu erwartende Nachhallzeit extreme Werte annimmt. Dies ist natürlich vor allem für den tieffrequenten Bereich, in welchem die Modenausbreitung im Raum noch von wesentlicher Bedeutung ist, wünschenswert und wertvoll zu wissen. Im mittleren und oberen Frequenzbereich kann das Schallfeld als so diffus betrachtet werden, dass der Ort der Messung auf die Nachhallzeit nur noch sehr geringen, ja sogar vernachlässigbaren Einfluss nimmt.



**Abbildung 1-51:** Minima, Maxima und Mittelwerte der Nachhallzeiten  $T_{30}$  (über alle 88 Messpunkte, alle gemessenen Höhen und Messmethoden)

Zum Abschluss dieser ersten Messung sind die Extremwerte, sowie die Mittelwerte (frequenzabhängig) – gemittelt über alle 88 Messpunkte in allen Messhöhen (0,5m, 1,2m und 2,0m) und über beide Messmethoden (MLS und Sweep) – in Abbildung 1-51 zusammengefasst.

### 1.2.3.2 Die zweite Messung – variable Position der Quelle ( $Q_1$ bis $Q_5$ )

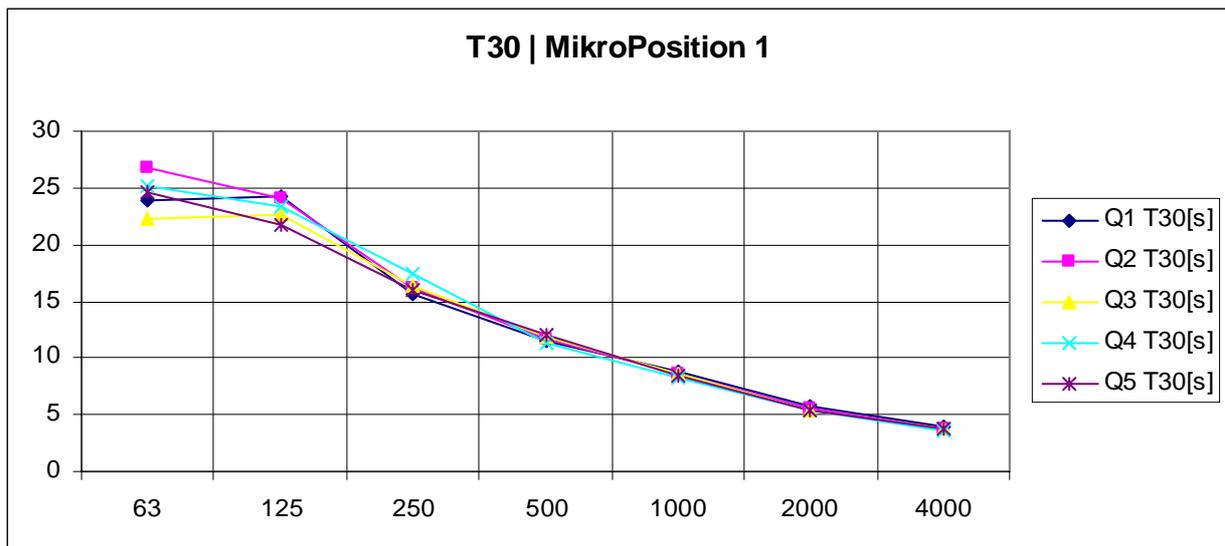
Für diese Messung wurde ein Subset von 16 Mikrofonen aus den ersten 264 Messpunkten (88 Messpunkte in drei verschiedenen Höhen) gewählt. Die Position der Quelle war im Gegensatz zur ersten Messung nicht an einer festen Stelle, sondern wurde an verschiedenen Stellen und Höhen im Raum positioniert, vgl. Abbildung 1-4. Auch hier kam sowohl die Sweep-, als auch die MLS-Methode zum Einsatz. Ziel dieser Messung war es, eine Abhängigkeit der Nachhallzeit im Hallraum von der Position der Quelle festzustellen. In den nachfolgenden Abbildungen werden die fünf Quellpositionen sowohl anhand der Nachhallzeit  $T_{30}$  als auch anhand der Early Decay Time EDT dargestellt. Die verschiedenen Messungen beruhen jeweils auf den 16 Messpunkten. Für die Mikrofonpositionen 1 bis 8 werden die Ergebnisse aus den

MLS-Messungen herangezogen, für die Mikrofonpositionen 9 bis 16 werden die Resultate der Sinus-Sweep-Messungen benutzt. Dies soll der Übersichtlichkeit dienen, im Anhang sind die Diagramme für jede Messmethode zu finden.



**Abbildung 1-52:** links und Mitte: Beispiel der Messanordnung zur Messung 1  
rechts: Beispiel der Messanordnung zur Messung 2

### *Mikrofonposition 1 (entspricht Rasterpunkt 18)*



**Abbildung 1-53:** Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 1 (Rasterpunkt 18)

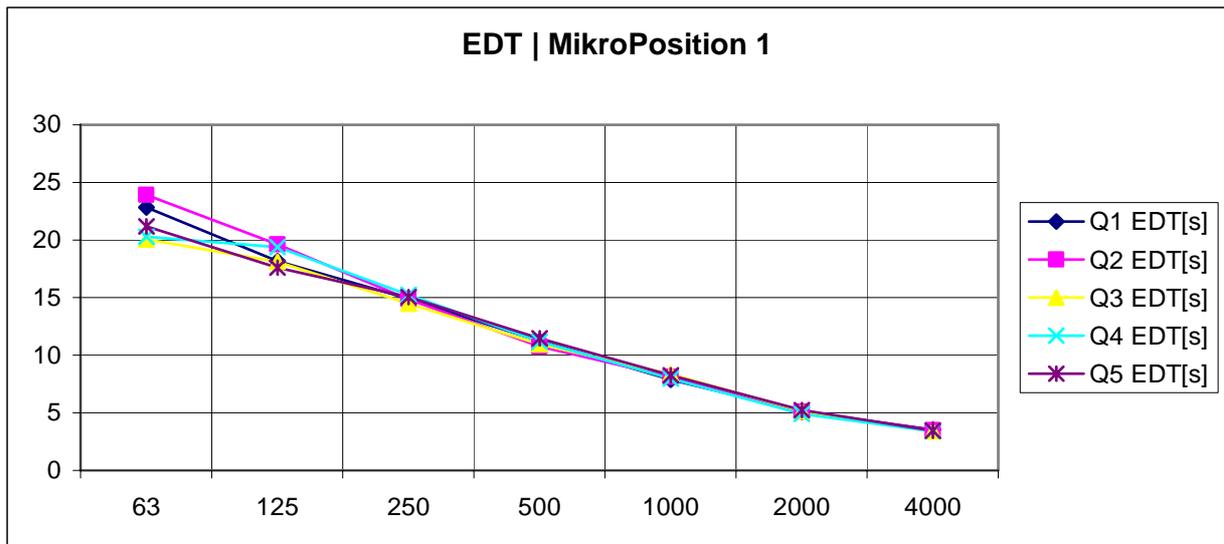


Abbildung 1-54: Early Decay Time für die Mikrofonposition 1 (Rasterpunkt 18)

### Mikrofonposition 2 (entspricht Rasterpunkt 29)

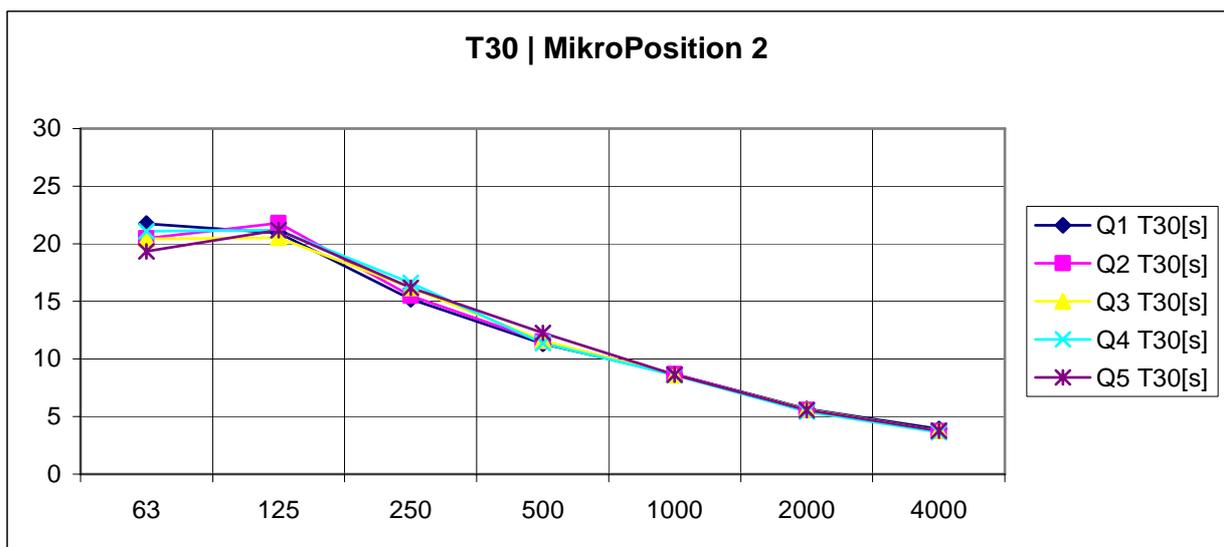


Abbildung 1-55: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 2 (Rasterpunkt 29)

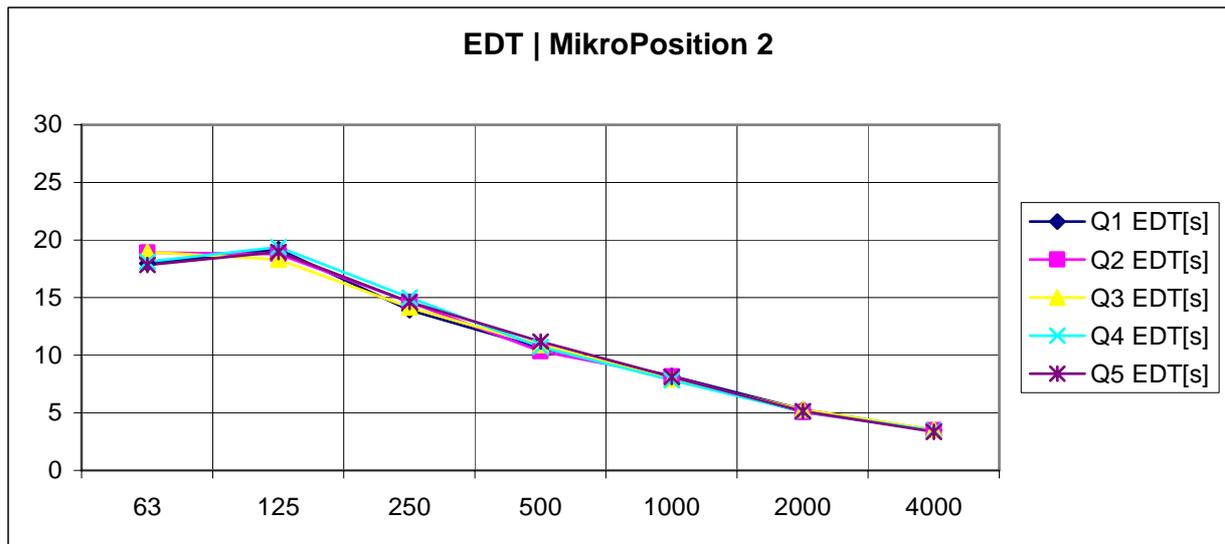


Abbildung 1-56: Early Decay Time für die Mikrofonposition 2 (Rasterpunkt 29)

*Mikrofonposition 3 (entspricht Rasterpunkt 11)*

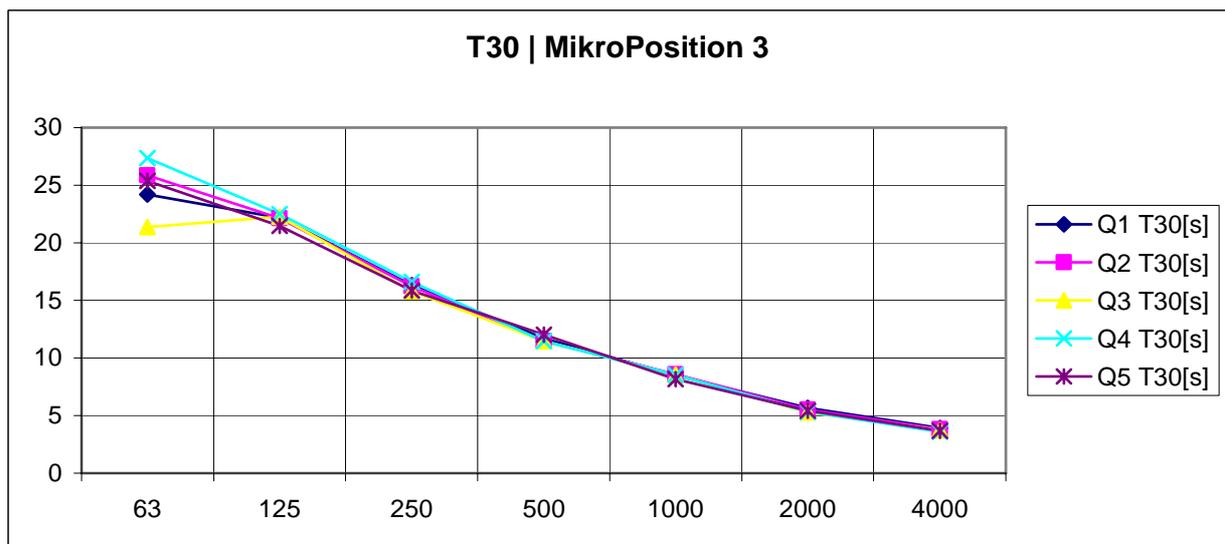


Abbildung 1-57: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 3 (Rasterpunkt 11)

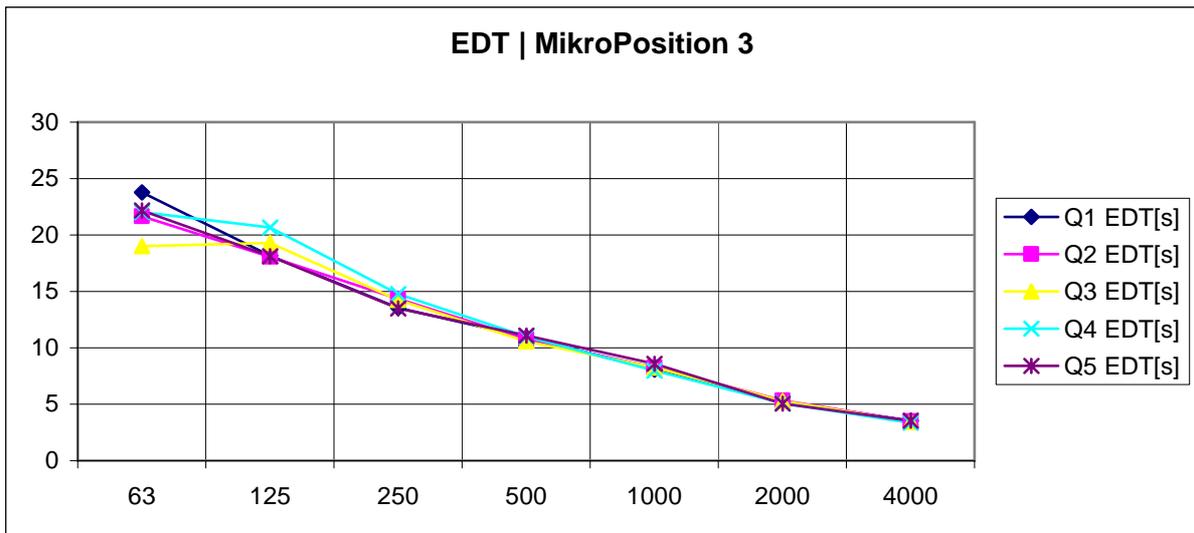


Abbildung 1-58: Early Decay Time für die Mikrofonposition 3 (Rasterpunkt 11)

*Mikrofonposition 4 (entspricht Rasterpunkt 27)*



Abbildung 1-59: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 4 (Rasterpunkt 27)

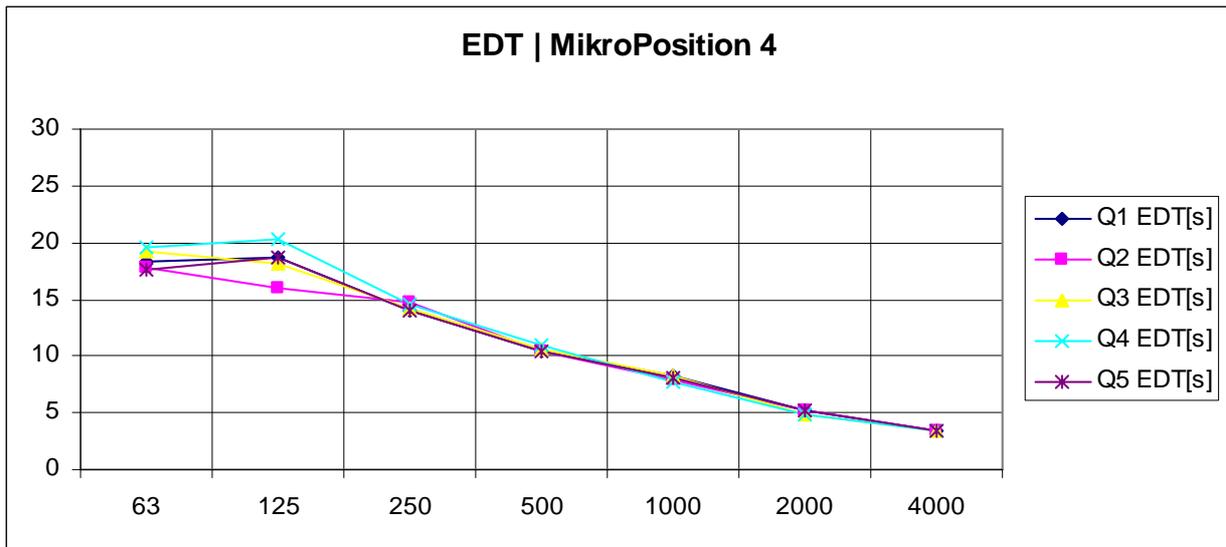


Abbildung 1-60: Early Decay Time für die Mikrofonposition 4 (Rasterpunkt 27)

*Mikrofonposition 5 (entspricht Rasterpunkt 38)*



Abbildung 1-61: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 5 (Rasterpunkt 38)

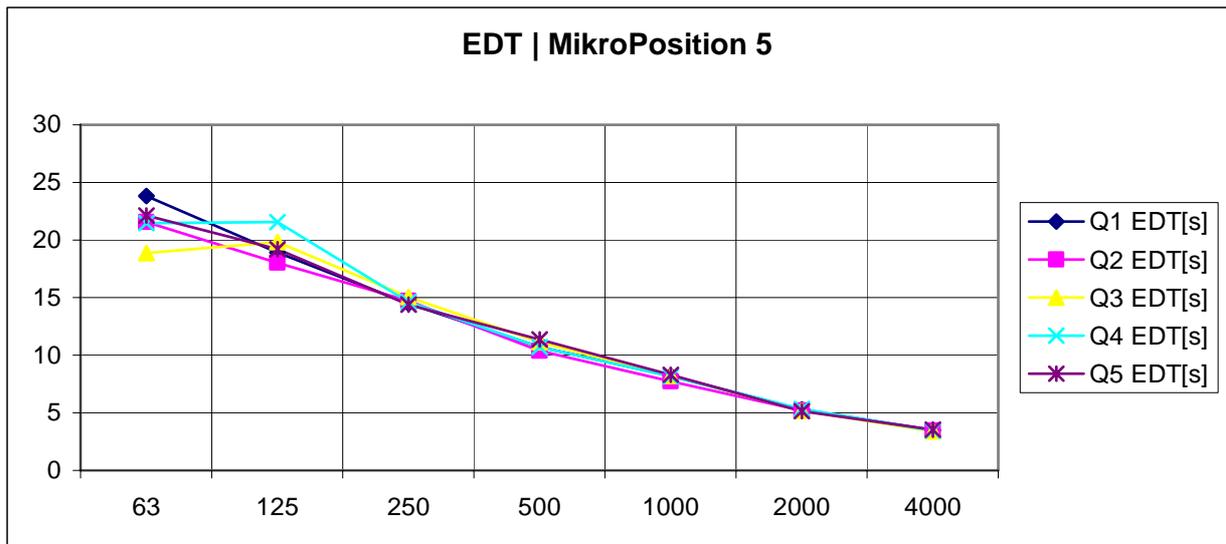


Abbildung 1-62: Early Decay Time für die Mikrofonposition 5 (Rasterpunkt 38)

*Mikrofonposition 6 (entspricht Rasterpunkt 1)*

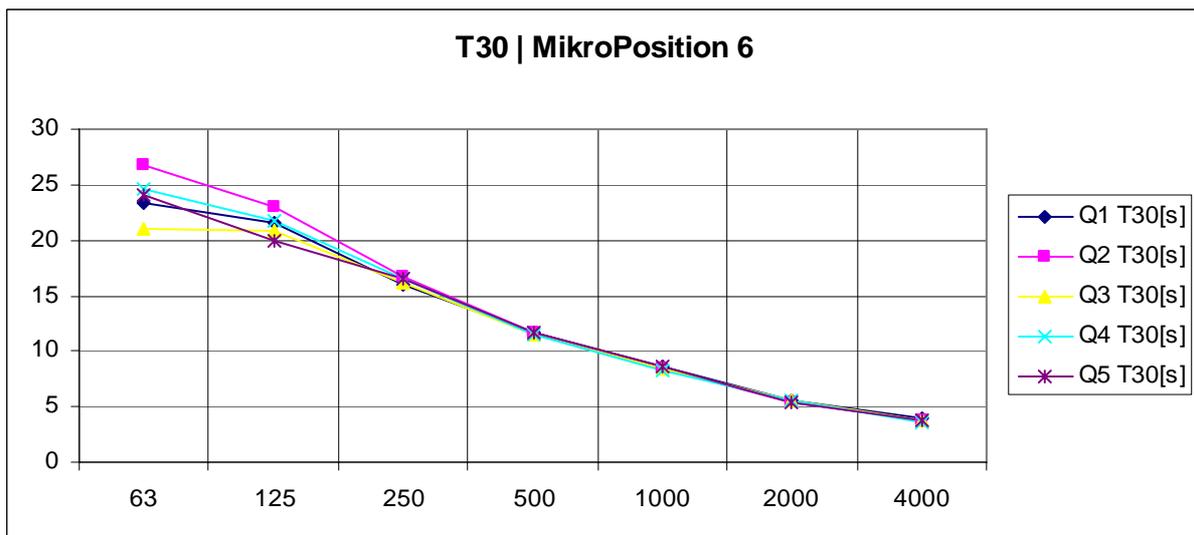


Abbildung 1-63: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 6 (Rasterpunkt 1)

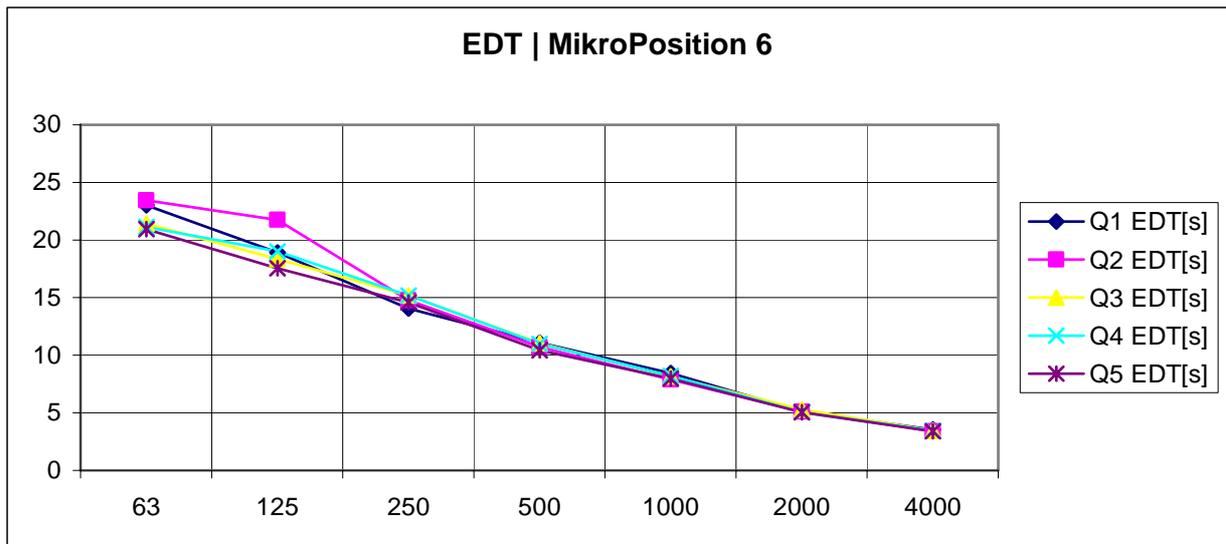


Abbildung 1-64: Early Decay Time für die Mikrofonposition 6 (Rasterpunkt 1)

*Mikrofonposition 7 (entspricht Rasterpunkt 20)*

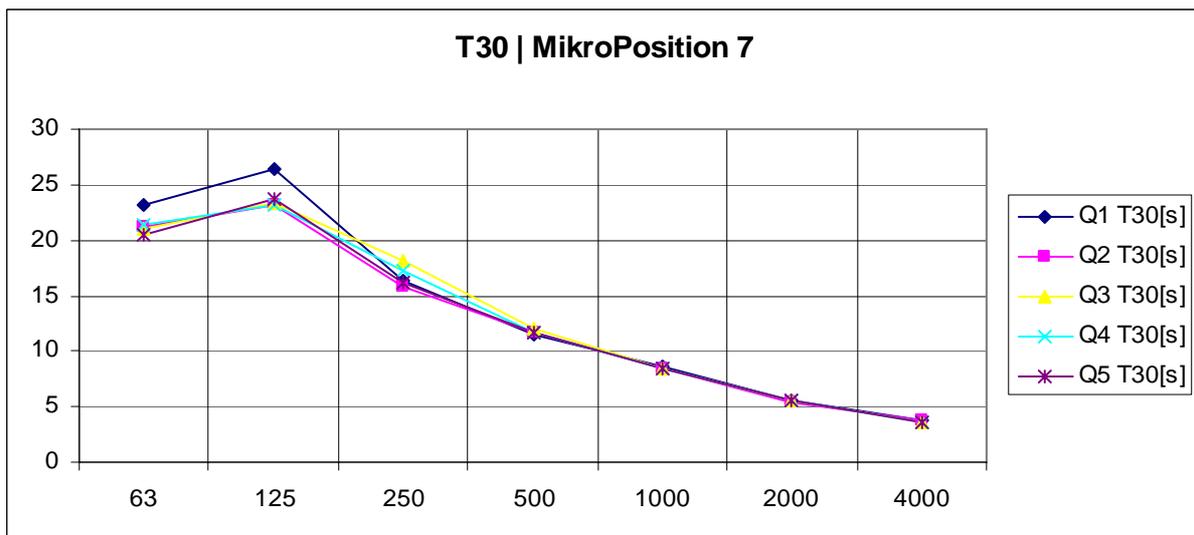


Abbildung 1-65: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 7 (Rasterpunkt 20)

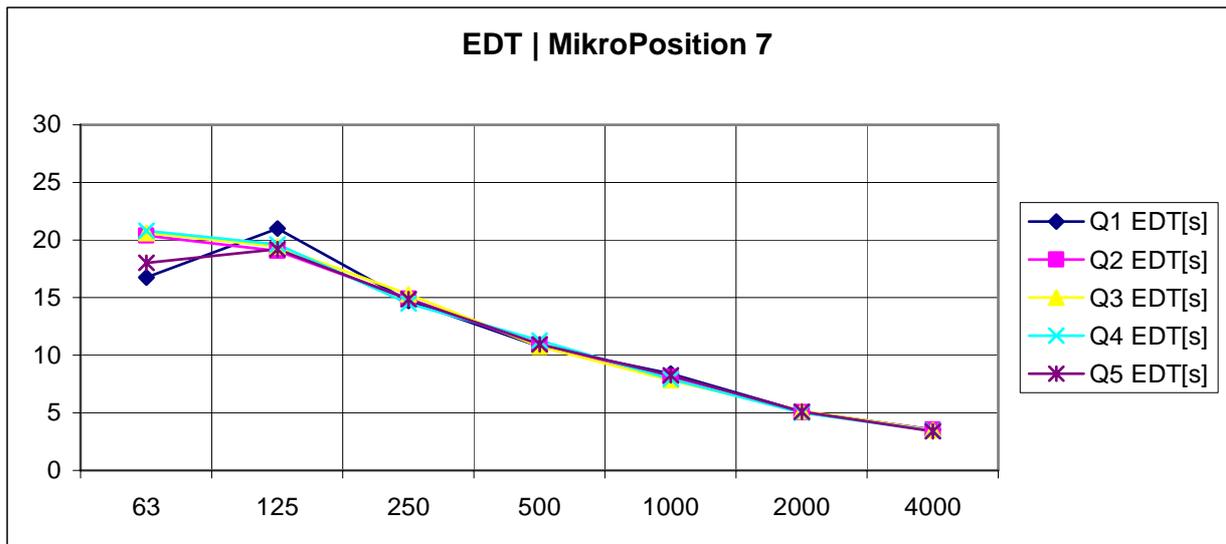


Abbildung 1-66: Early Decay Time für die Mikrofonposition 7 (Rasterpunkt 20)

**Mikrofonposition 8 (entspricht Rasterpunkt 36)**

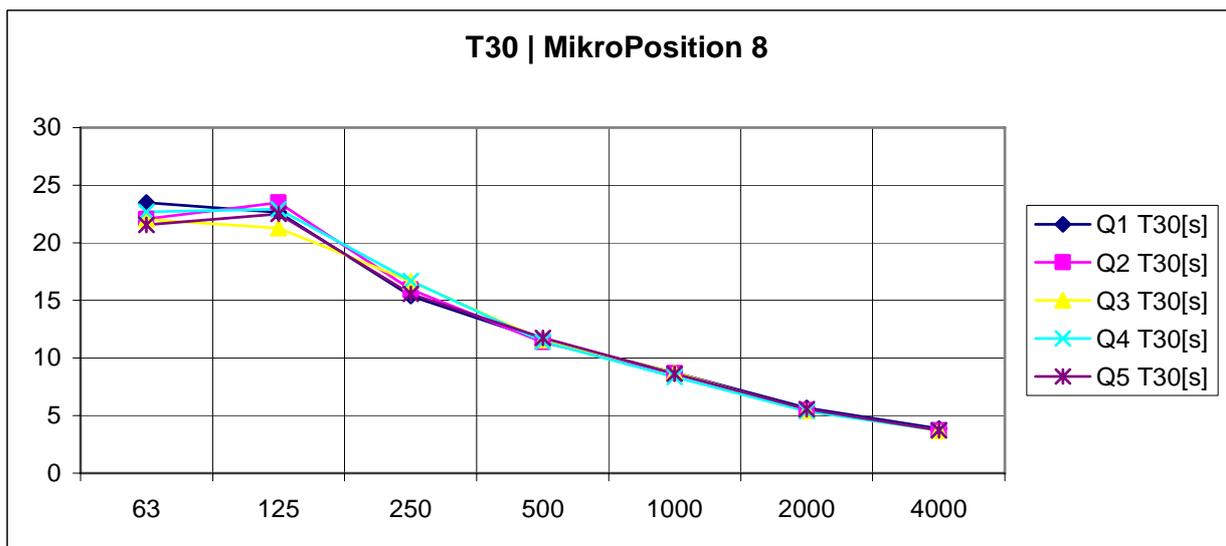


Abbildung 1-67: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 8 (Rasterpunkt 36)

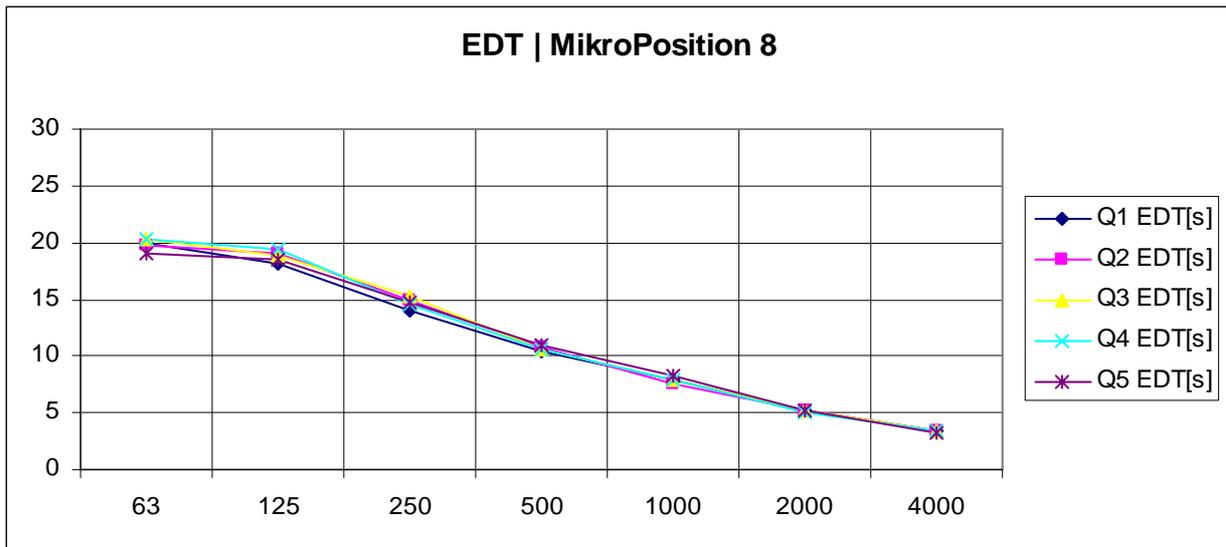
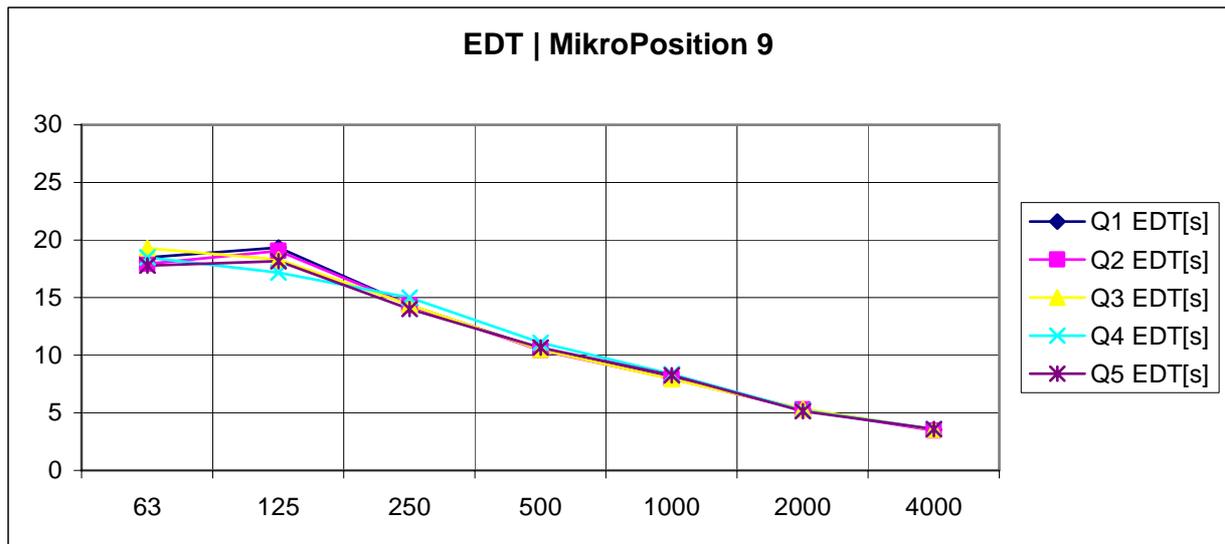


Abbildung 1-68: Early Decay Time für die Mikrofonposition 8 (Rasterpunkt 36)

*Mikrofonposition 9 (entspricht Rasterpunkt 59)*



Abbildung 1-69: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 9 (Rasterpunkt 59)



**Abbildung 1-70:** Early Decay Time für die Mikrofonposition 9 (Rasterpunkt 59)

*Mikrofonposition 10 (entspricht Rasterpunkt 70)*



**Abbildung 1-71:** Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 10 (Rasterpunkt 70)

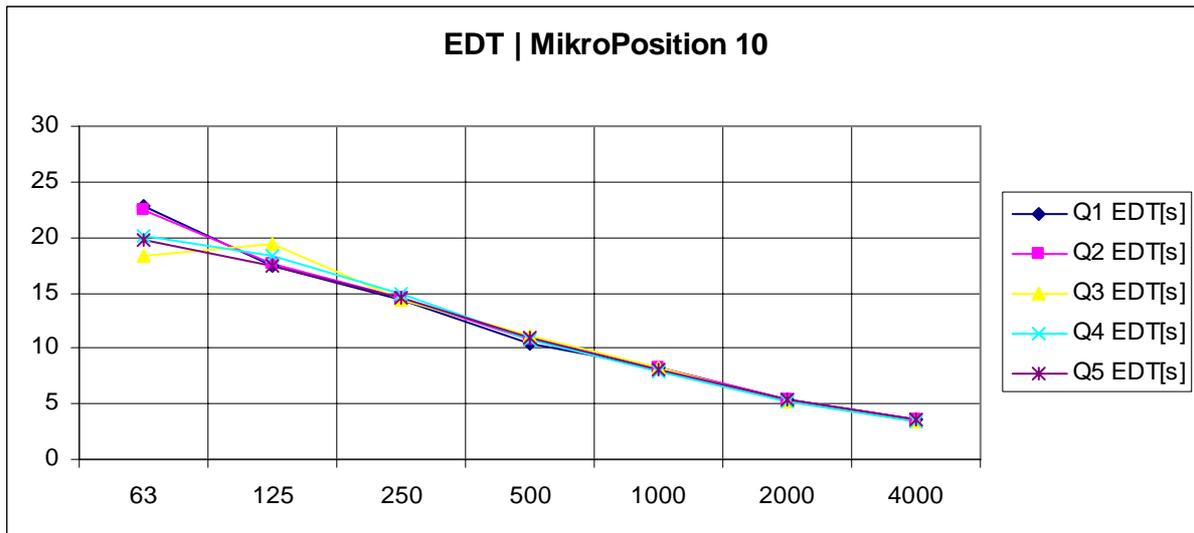


Abbildung 1-72: Early Decay Time für die Mikrofonposition 10 (Rasterpunkt 70)

*Mikrofonposition 11 (entspricht Rasterpunkt 52)*



Abbildung 1-73: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 11 (Rasterpunkt 52)



Abbildung 1-74: Early Decay Time für die Mikrofonposition 11 (Rasterpunkt 52)

*Mikrofonposition 12 (entspricht Rasterpunkt 68)*

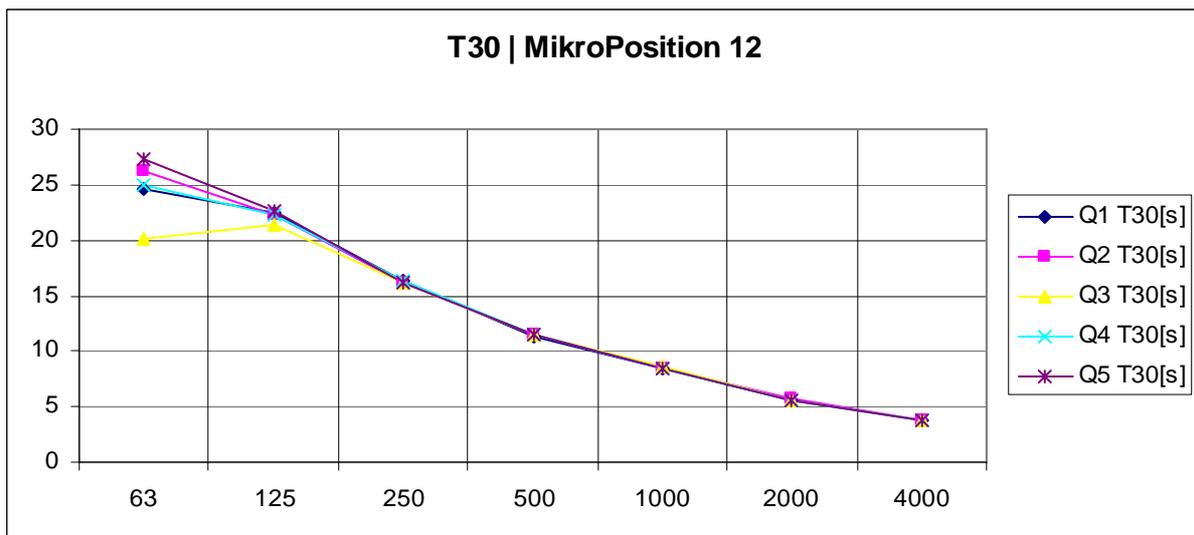


Abbildung 1-75: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 12 (Rasterpunkt 68)

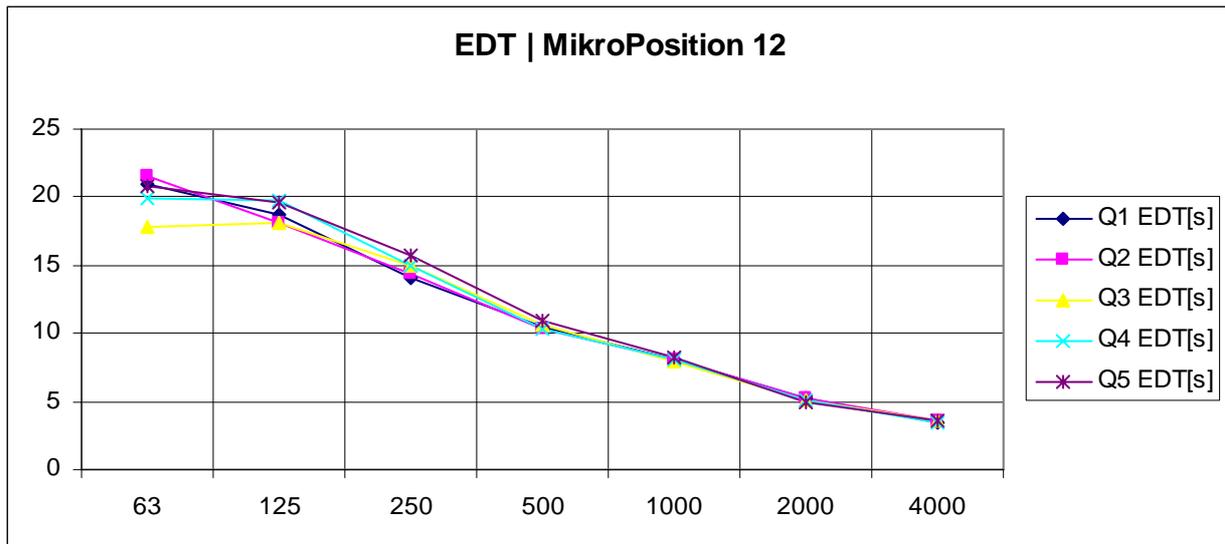


Abbildung 1-76: Early Decay Time für die Mikrofonposition 12 (Rasterpunkt 68)

*Mikrofonposition 13 (entspricht Rasterpunkt 79)*

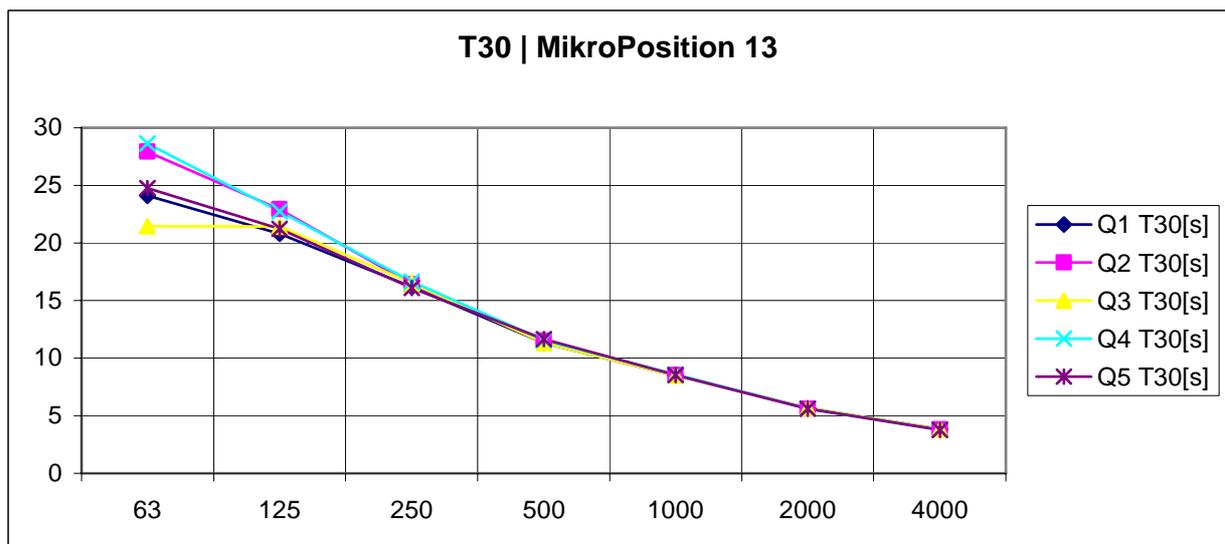


Abbildung 1-77: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 13 (Rasterpunkt 79)

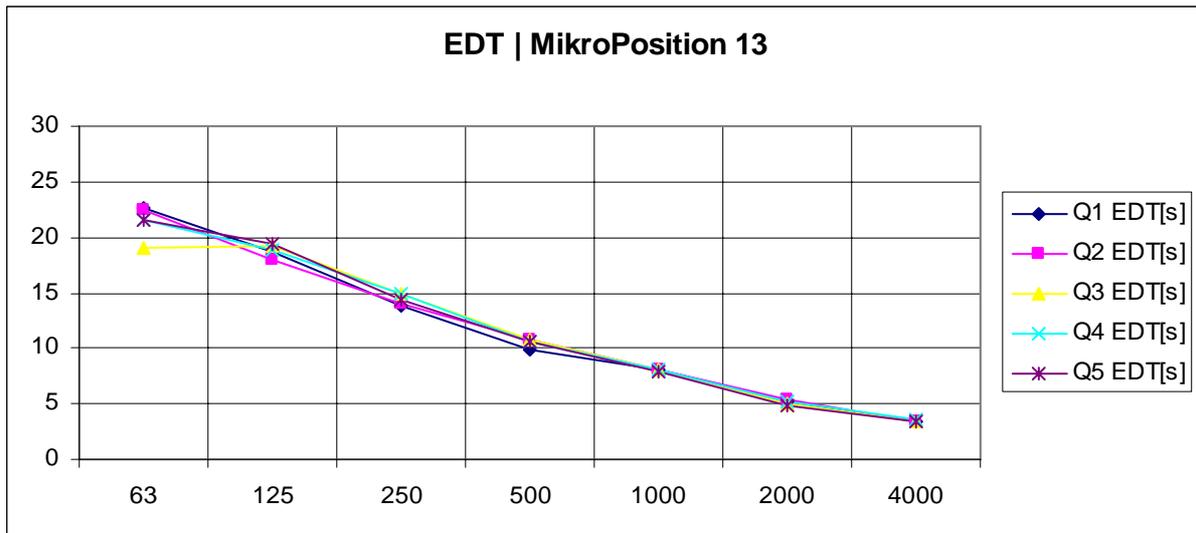


Abbildung 1-78: Early Decay Time für die Mikrofonposition 13 (Rasterpunkt 79)

*Mikrofonposition 14 (entspricht Rasterpunkt 50)*

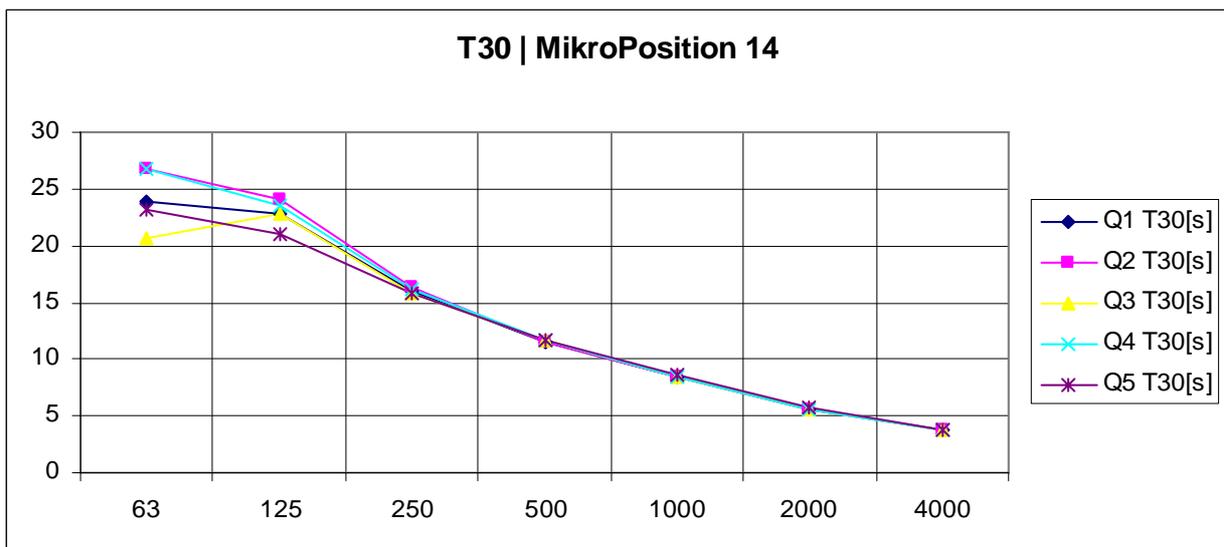


Abbildung 1-79: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 14 (Rasterpunkt 50)

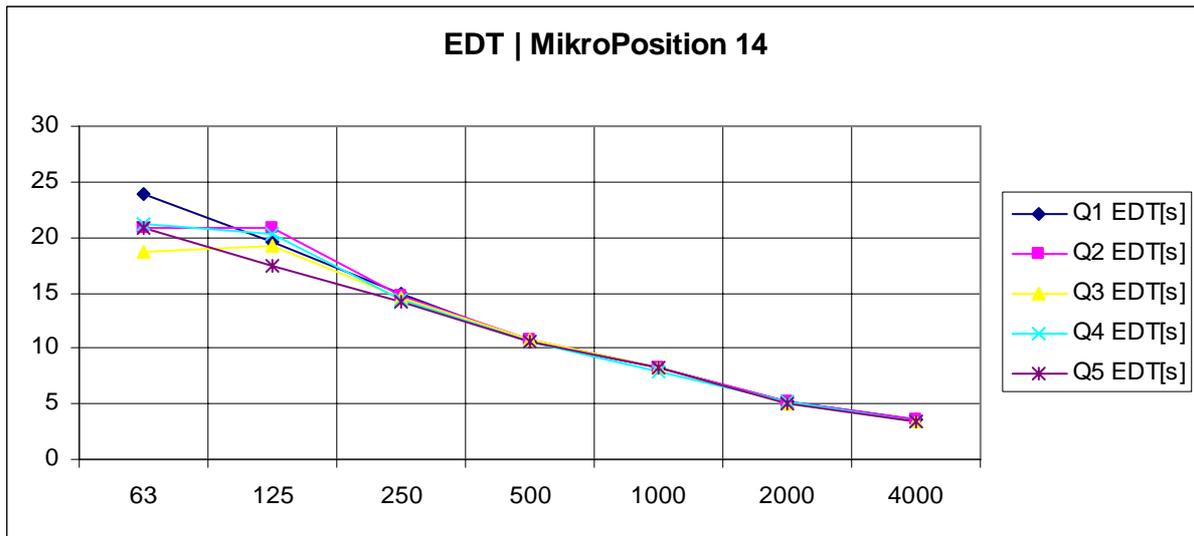


Abbildung 1-80: Early Decay Time für die Mikrofonposition 14 (Rasterpunkt 50)

*Mikrofonposition 15 (entspricht Rasterpunkt 61)*



Abbildung 1-81: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 15 (Rasterpunkt 61)

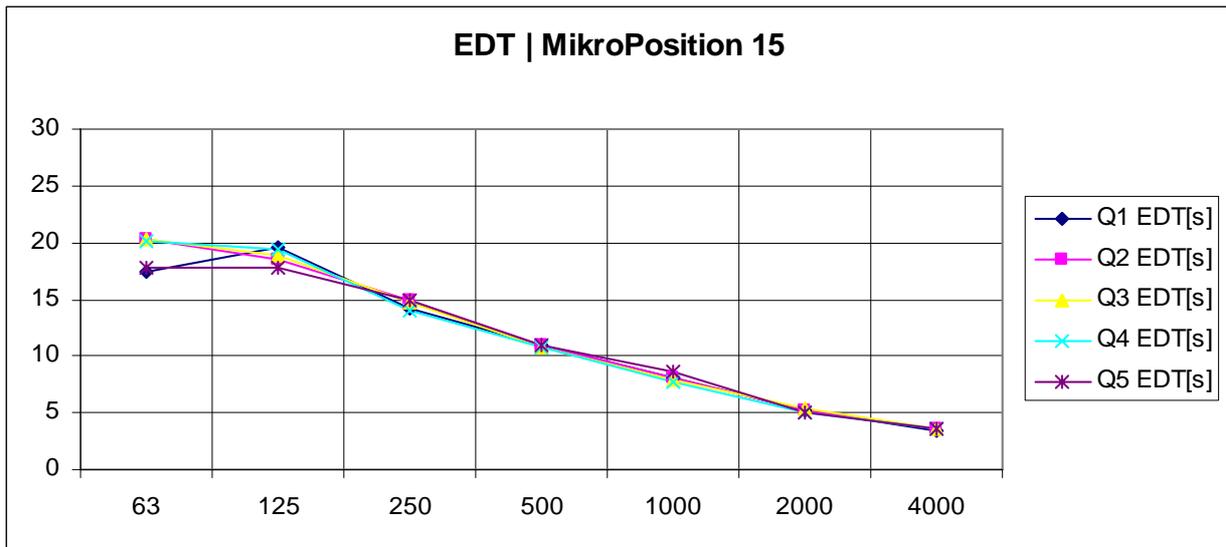


Abbildung 1-82: Early Decay Time für die Mikrofonposition 15 (Rasterpunkt 61)

*Mikrofonposition 16 (entspricht Rasterpunkt 77)*

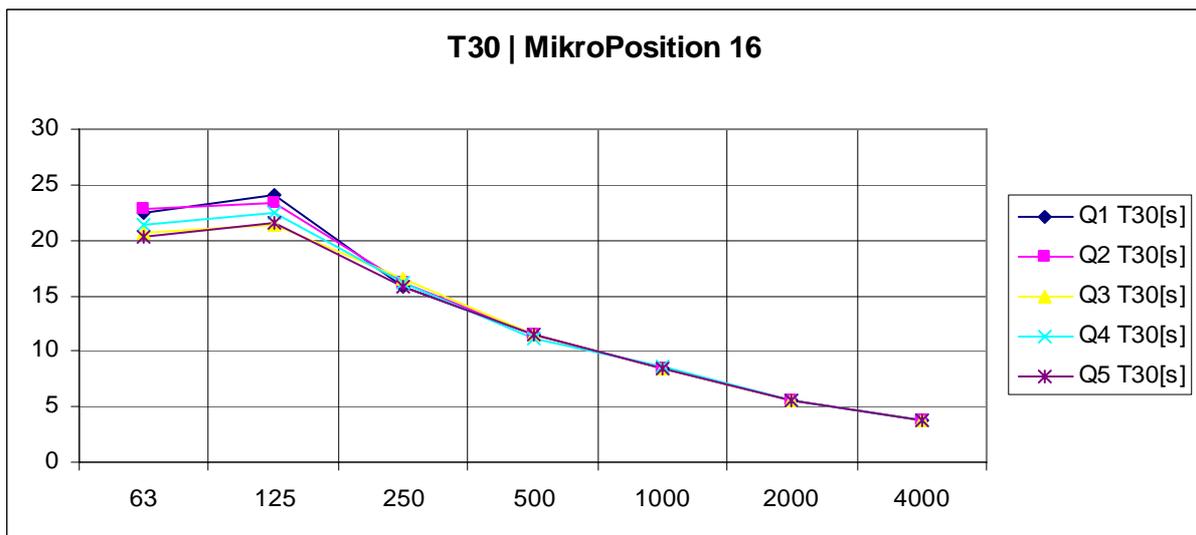
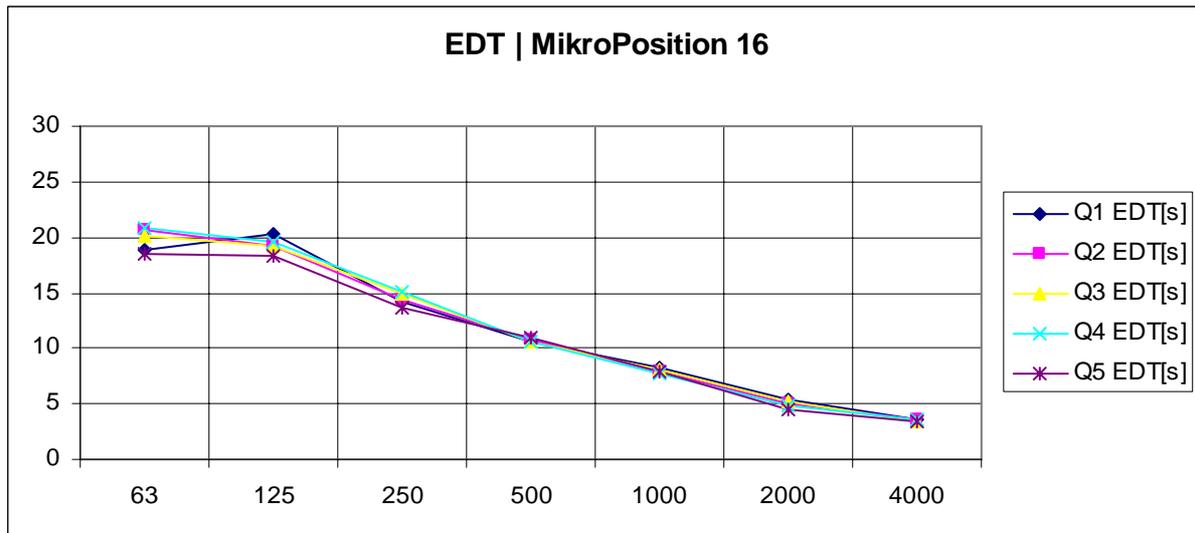


Abbildung 1-83: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 16 (Rasterpunkt 77)



**Abbildung 1-84:** Early Decay Time für die Mikrofonposition 16 (Rasterpunkt 77)

Um eine Reihenfolge der Quellpositionen aufzustellen, welche Position die im Durchschnitt höchsten bzw. niedrigsten Nachhallzeiten und / oder EDTs liefert, wurde Tabelle 1.6 erstellt. Für die beiden unteren Frequenzbänder 63Hz und 125Hz wurde jeder Quelle ein Index von 1 bis 5 zugeordnet, wobei 1 für den größten und 5 für den kleinsten Wert steht. Anschließend wurde über die sechzehn Mikrofonpositionen gemittelt, somit erhält jede Quelle einen Index pro Frequenzband und Parameter, der angibt, ob hohe oder tiefe Nachhallzeiten bzw. EDTs zu erwarten sind, die Indices sind vergleichbar mit dem Schulnotensystem, d. h. die Quelle mit der längsten Nachhallzeit bekommt eine 1, die mit der kleinsten Nachhallzeit bekommt eine 5. Es ist bewusst darauf verzichtet worden, ein Ranking anhand der eigentlichen Nachhallzeiten zu erstellen, da die hier benutzte Index-Methode nicht direkt vom gemessenen Wert abhängt.

	Nachhallzeit T30										Early Decay Time									
	63Hz					125Hz					63Hz					125Hz				
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
1	4	1	5	2	3	1	2	4	3	5	2	1	5	4	3	3	1	4	2	5
2	1	3	4	2	5	4	1	5	2	3	4	2	1	3	5	2	4	5	1	3
3	4	2	5	1	3	3	4	2	1	5	1	4	5	3	2	3	5	2	1	4
4	2	5	3	1	4	2	5	1	3	4	3	4	2	1	5	2	5	4	1	3
5	4	2	5	1	3	3	1	5	4	2	1	3	5	4	2	4	5	2	1	3
6	4	1	5	2	3	3	1	4	2	5	2	1	3	4	5	3	1	4	2	5
7	1	3	4	2	5	1	3	4	5	2	5	2	3	1	4	1	5	3	2	4
8	1	3	4	2	5	3	1	5	2	4	3	4	1	2	5	5	2	3	1	4
9	2	1	4	3	5	2	1	4	3	5	3	4	1	2	5	1	2	3	5	4
10	4	1	5	2	3	1	3	2	4	5	1	2	5	3	4	4	3	1	2	5
11	4	3	5	1	2	3	1	5	2	4	1	2	5	3	4	3	2	4	1	5
12	4	2	5	3	1	2	3	5	4	1	2	1	5	4	3	3	4	5	1	2
13	4	2	5	1	3	5	1	3	2	4	1	2	5	3	4	4	5	2	3	1
14	3	1	5	2	4	3	1	4	2	5	1	4	5	2	3	3	1	4	2	5
15	3	1	4	2	5	1	2	5	3	4	2	1	4	3	5	1	2	5	3	4
16	2	1	4	3	5	1	2	5	3	4	4	2	3	1	5	1	3	4	2	5
$\Sigma$	47	32	72	30	59	38	32	63	45	62	36	39	58	43	64	43	50	55	30	62
$\emptyset$	2,9	2,0	4,5	1,9	3,7	2,4	2,0	3,9	2,8	3,9	2,3	2,4	3,6	2,7	4,0	2,7	3,1	3,4	1,9	3,9

**Tabelle 1.5:** Ranking der verschiedenen Quellpositionen bezüglich ihrer Ergebnisse in den Frequenzbändern 63Hz und 125Hz für die Nachhallzeit T30 und die EDT

Betrachtet man die Nachhallzeit T30 bei 63Hz, so liefert die Quellposition Q<sub>3</sub> die niedrigsten, Quellposition Q<sub>4</sub> die höchsten Werte, wie bei der EDT im gleichen Frequenzband, wo die kleinsten Werte ebenfalls von Q<sub>3</sub>, die größten allerdings von Q<sub>2</sub> stammen. Interessant ist, dass Q<sub>3</sub> immer minimale Ergebnisse liefert. In Abbildung 1-4 ist zu sehen, dass sich die Quellposition Q<sub>3</sub> in der Mitte der rechten Raumhälfte auf einer Höhe von 157cm befindet. Die relativ kleinen Werte dieser Quellposition sind auf diese Geometrie zurückzuführen, d.h. diese Quellposition ist von allen seitlichen Begrenzungsflächen einigermaßen weit entfernt, vergleicht man sie mit den anderen Positionen. Der Schall hat nun also weitere Wege in Luft zurückzulegen, bevor er an den Wänden reflektiert wird. Es ist hier schon mit einer größeren Absorption in Luft zu rechnen, außerdem kommt es somit erst später zu Interferenzerscheinungen, die sich in diesen Frequenzen natürlich besonders auswirken.

Bei 125Hz stellt man fest, dass hier die kleinsten Werte sowohl für die T30, als auch für die EDT von Quellposition Q<sub>5</sub> stammen. Die größten Werte hingegen liefert Quellposition Q<sub>1</sub> für die Nachhallzeit, bzw. Quellposition Q<sub>4</sub> für die Early Decay Time, obwohl auch bei der Quellposition Q<sub>3</sub> eine ähnliche Tendenz wie für 63Hz zu erkennen ist.

Wie schon bei der ersten Messung ist deutlich festzustellen, dass Abhängigkeiten, in diesem Fall von der Quellposition, nur im unteren Frequenzbereich wesentlich sind. Ab einer Frequenz von 250Hz sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Quellpositionen nicht mehr auszumachen. Dies gilt auch für beide Messmethoden, MLS-Messung und Sweep-Messung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Schallfeld im Hallraum der TU Graz ab einer Frequenz von ungefähr 500Hz so diffus ist, dass man eine Abhängigkeit der Nachhallzeit weder von der Mikrofonposition, noch von der Quellposition feststellen kann. Das ist auch an den Abbildungen in Kapitel 1.2.3.1 gut zu sehen. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit der Theorie von *Schroeder* überein, der für einen Hallraum dieser Geometrie und Größe (8,34m x 5,99m x 4,90m, also 244,79m<sup>3</sup> Volumen) eine Grenzfrequenz von  $f_S=458,6\text{Hz}$  postuliert (vgl. Formel 1.14). Die Norm bezieht sich hier aber eher auf die von *Meyer* und *Kuttruff* geforderte Grenzfrequenz (vgl. Formel 1.4), die für den TU Graz Hallraum bei  $f_{MK}=159,9\text{Hz}$  liegt. Die nicht ausreichende Diffusität des Schallfeldes im Hallraum der TU Graz kann bei Frequenzen unter 500Hz durch eine Mittelung mehrerer Messungen an verschiedenen Positionen ausgeglichen werden. Unter 160Hz werden noch mehr Mittelungen notwendig, um einen repräsentativen Wert zu bekommen. Hier sind allerdings die zweidimensionalen Abbildungen im Kapitel 1.2.3.1 sehr hilfreich um Zonen im Hallraum zu finden an denen der zu erwartende Wert der Nachhallzeit minimal, maximal oder eher durchschnittlich ist.

## 1.3 Die Simulation

Hier werden die Ergebnisse der Simulation des Hallraums der TU Graz vorgestellt, einerseits mit, andererseits ohne Segelflächen. Zunächst wird noch auf die Simulationssoftware CATT-Acoustic genauer eingegangen. Allgemein lässt sich über heutige Simulationsprogramme sagen, dass annähernd alle auf zwei Verfahren basieren, die meist miteinander kombiniert werden: beim so genannten Strahlverfolgungsverfahren (engl. ray-tracing) werden einzelne Teilchen, Strahlen oder Strahlenbündel (konus- oder pyramidenförmig) von der Schallquelle ausgehend auf dem Weg zum Empfänger (engl. receiver) verfolgt, wobei Reflexionen an den Flächen im Raum sowohl spiegelnd, als auch diffus berücksichtigt werden können. Das Spiegelquellenverfahren (engl. image-source) basiert andererseits auf der Überlegung, dass sich hinter jeder reflektierenden Wand eine virtuelle Spiegelschallquelle befindet, die gleichzeitig mit der realen Quelle Schall abstrahlt, und dessen Stärke vom Reflexionsgrad der Wand abhängig ist. Das Schallfeld im Raum ergibt sich durch Überlagerung der Schallanteile aller relevanten Spiegelschallquellen auch höherer Ordnung, d.h. an anderen Wänden gespiegelter Spiegelquellen<sup>15</sup>.

### 1.3.1 Software CATT-Acoustic

CATT-Acoustic ist eine, wie oben schon beschriebene, raumakustische Simulationssoftware, die akustische Vorhersagen mit hoher Genauigkeit erlaubt. Dabei ist die Verwendung beliebiger Oberflächen und Quellen möglich. Streugrade von Oberflächen können miteinbezogen werden, was sich allerdings auf Grund der wenigen bekannten Werte über die Diffusität verschiedener Materialien recht schwer realisieren lässt<sup>16</sup>. Besonderheiten der Software sind vor allem eine Schnittstelle für dynamische Lautsprecherdaten, d.h. das Abstrahlverhalten einer Quelle kann mit vorangegangenen Messungen in der Simulation berücksichtigt werden, wie

---

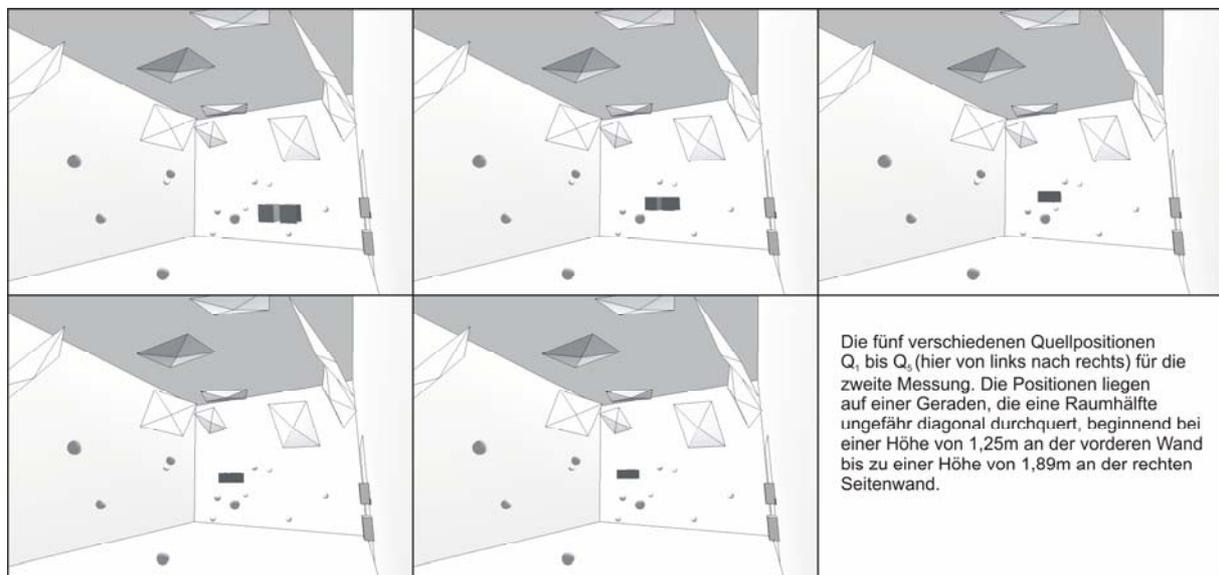
<sup>15</sup> vgl. [BORK]

<sup>16</sup> vgl. [BORK 2]

dies auch für diese Simulation geschehen ist. Die momentane Version 8.0 berechnet 8 Oktavbänder von 125 Hz bis 16 kHz. Grundsätzlich teilt sich die Anwendung in vier verschiedene Module auf: Geometry View / Check, Audience Area Mapping, Early Part Detailed ISM (Image Source Model), Full Detailed Calculation.

Das erste Modul „Geometry View / Check“ stellt die Geometrie der eingegebenen Daten dreidimensional dar und lässt deren Richtigkeit überprüfen. „Audience Area Mapping“ erlaubt es, verschiedene raumakustische Parameter zwei- oder dreidimensional über eine definierte ‚Publikumsfläche‘ darzustellen. Die „Early Part Detailed ISM“ liefert Echogramme für jedes Frequenzband. Das für diese Diplomarbeit wichtigste Modul ist jedoch die „Full Detailed Calculation“. Es ist hier möglich für jeden ‚receiver‘, also für jeden Messpunkt, in jedem Oktavband ein Echogramm zu berechnen. Zur Berechnung wird die Methode des „randomized tail-corrected cone-tracing (RTC)“ herangezogen. Der direkte Schall, Reflexionen erster Ordnung, diffuse Reflexionen, sowie Reflexionen zweiter Ordnung werden getrennt behandelt, da somit die Richtigkeit auch bei geringer Strahlanzahl gewährleistet ist. Auf Grund der frequenzabhängigen Diffusität der Materialien wird auch jedes Oktavband einzeln berechnet. RTC kombiniert die Eigenschaften der Standard-Strahlverfolgung und des Spiegelquellenmodells. Die RTC ist eine robuste numerische Vorhersage-Methode, die dennoch auch Nachteile hat. Daher werden, wie schon erwähnt, der direkte Schall, Reflexionen und diffuse Reflexionen erster Ordnung und auch Reflexionen zweiter Ordnung mit dem Spiegelquellenmodell deterministisch bestimmt<sup>17</sup>.

Die Simulation ist vergleichbar mit der Messung 2 aus dem Kapitel 1.2.3.2, d.h. es gibt sechzehn ‚receiver‘, also Messpunkte, die genau dem Subset an Mikrofonen der zweiten Messung entsprechen. Und es gibt, genau wie in der zweiten Messung, fünf verschiedene Quellpositionen. Es sei hierfür noch mal auf Abbildung 1-4 verwiesen.



**Abbildung 1-85:** 3D-Ansichten der Simulation

In Abbildung 1-85 sind neben der „wandernden“ Quelle auch die sechzehn Empfängerpositionen zu erkennen. Für die Simulation ohne Segelflächen bleiben sowohl die Positionen der

<sup>17</sup> vgl. [DALENBÄCK]

Quelle, als auch die Empfängerpositionen gleich. Die Diffusoren (Segelflächen) wurden natürlich in der so genannten Geo-Datei der CATT-Simulation nicht mehr mit geladen.

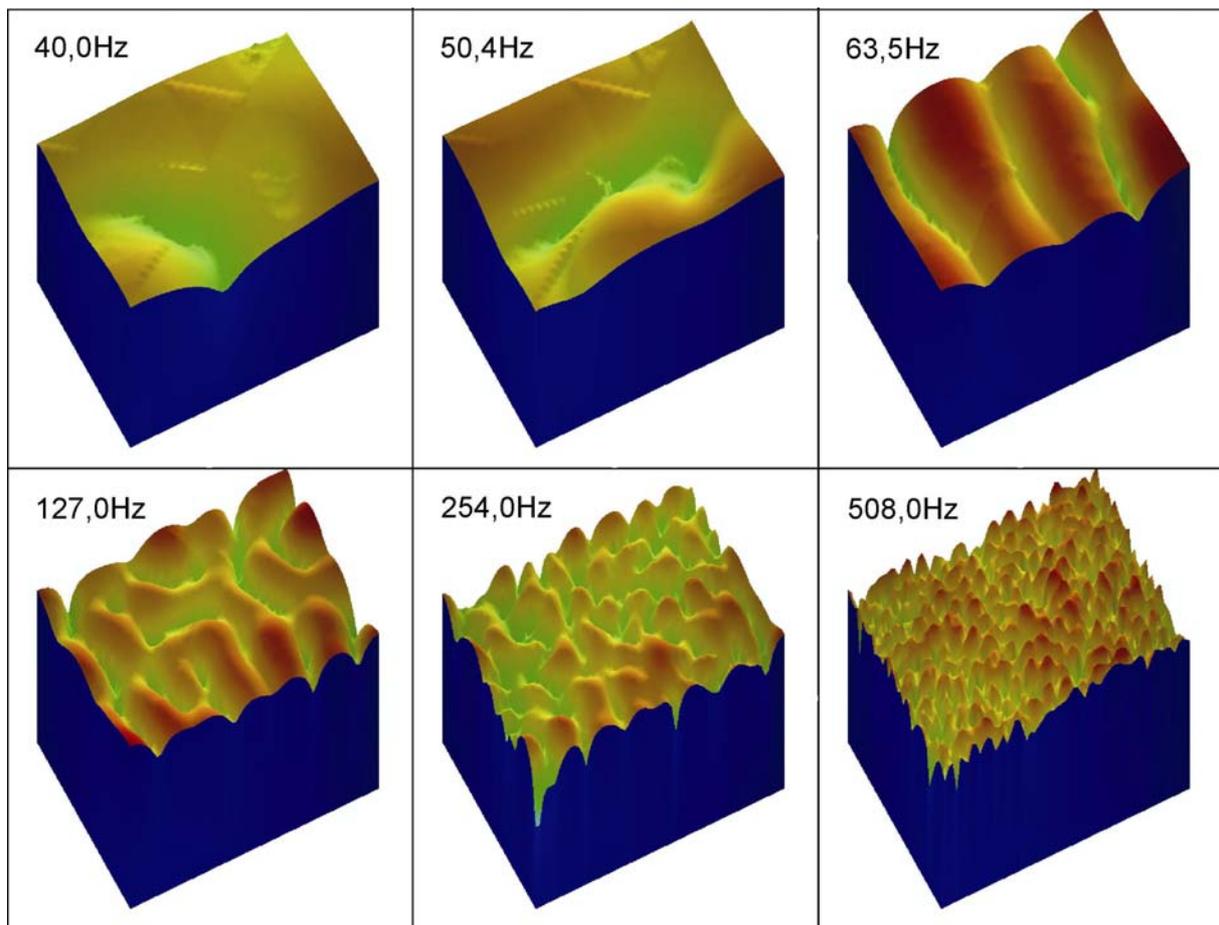
Zunächst galt es, Absorptionskoeffizienten für die Raumbegrenzungsflächen und für die Diffusoren zu finden. Ausgehend von Werten, die in der Literatur<sup>18</sup> zu finden sind und empirisch ermittelten Werten aus einer Simulation des Labors für Bauphysik an der TU Graz, wurden die Absorptionskoeffizienten sukzessive verfeinert, um mit den Nachhallzeiten der Simulation näherungsweise gleiche Ergebnisse wie in den Messungen zu erreichen. Da die Segelflächen im tieffrequenten Bereich auch Wirkung als Plattenabsorber haben – auf Grund der Aufhängung und der eigenen Steifigkeit können sie in Schwingungen versetzt werden – werden in diesem Bereich etwas höhere Absorptionsgrade angenommen.

Material		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Wände	Start	0,65	0,70	0,80	1,00	1,00	1,00
Diffusoren		4,00	3,00	3,00	2,00	1,00	1,00
Wände	Ende	0,71	0,76	1,12	1,29	1,91	2,40
Diffusoren		2,50	1,40	1,80	1,20	1,20	1,20

**Tabelle 1.6:** Start- und Endwerte (in Prozent!) der sukzessiven Annäherung der Absorptionskoeffizienten für die Materialien im Hallraum

Prinzipiell kann über die Simulation gesagt werden, dass niemals die gleichen Ergebnisse erreicht werden können, wie dies bei einer detaillierten Messung der Fall ist. Hinzu kommen Effekte, die nicht vorhersehbar sind und somit auch in einer Simulation nicht berücksichtigt werden können. Das bedeutet konkret für diese Simulation, dass einerseits die Absorptionskoeffizienten für die Materialien im Hallraum nicht hinreichend bekannt waren, sondern auf die Messung abgestimmt wurden. Andererseits ist eine starke Ortsabhängigkeit der Nachhallzeit  $T_{30}$ , und auch der Anfangsnachhallzeit EDT wie sie in den vorangegangenen Messungen vor allem für den tieffrequenten Bereich gezeigt wurden, in der Simulation nicht zu erkennen. Eine Simulation vergleichbar der ersten Messung hat dies weiter bestätigt. Es mag vor allem daran liegen, dass die hier verwendete Software die Phase des Schalldrucks nicht mit in die Rechnung einbezieht, da von den akustisch wirksamen Oberflächen ohnehin nur die Beträge des Absorptionsgrades bekannt sind. Ein Vergleich mit einer anderen Simulationssoftware aus dem Consumer-Bereich (CARA 2.2 - Computer Aided Room Acoustics) zeigt aber, dass dies doch möglich wäre. Nachteil dieser Anwendung ist allerdings, dass hier die Simulation mit nur sehr einfachen geometrischen Formen möglich ist. Eine Modellierung der Diffusoren war beispielsweise nicht möglich. Daher wurden die Segelflächen bei dieser Simulation auch außer Acht gelassen, zumal sie für diesen kurzen Vergleich auch keine Relevanz haben. In Abbildung 1-86 ist der dreidimensionale Verlauf des Schalldruckpegels dargestellt. Natürlich ist dieser nicht mit der Nachhallzeit  $T_{30}$  in direkten Vergleich zu setzen, dennoch kann behauptet werden, dass Zonen mit großem Schalldruckpegel auch hohe Nachhallzeiten haben.

<sup>18</sup> vgl. [FASOLD]



**Abbildung 1-86:** Der Verlauf des Schalldruckpegels im Hallraum (simuliert mit CARA 2.2)

### 1.3.2 Simulation mit Segelflächen

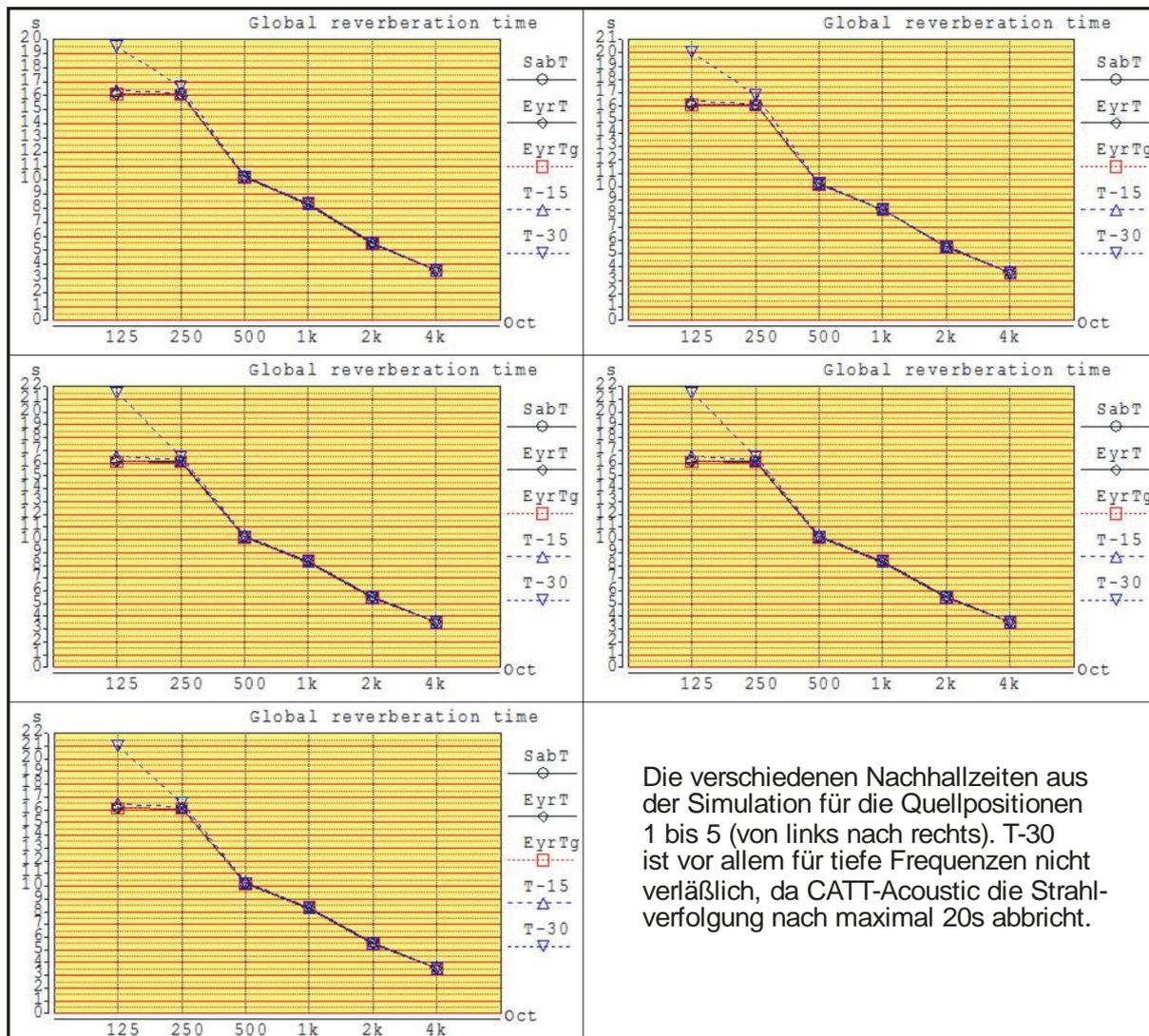


Abbildung 1-87: Die verschiedenen Nachhallzeiten der Simulation mit Segelflächen

Zu den verschiedenen Nachhallzeiten ist folgendes zu sagen: SabT steht für die berechnete *Sabine*'sche Nachhallzeit (vgl. Formel 1.8). EyrT steht für die *Eyring*'sche Nachhallzeit (vgl. Formel 1.7). EyrTg – mit g für geometrisch – steht ebenfalls für die *Eyring*'sche Nachhallzeit, mit dem Unterschied, dass hier der von den Flächen im Raum abhängige Absorptionskoeffizient AbsCg („area-weighted“) benutzt wird (eine Eigenheit von CATT-Acoustic), und nicht der mittlere Absorptionsgrad AbsC, was für dieses Modell allerdings keine Rolle spielt, da der simulierte Raum eine sehr einfache Form hat und daher diese beiden Werte, AbsC und AbsCg, nicht voneinander abweichen. Mit anderen Worten, EyrT und EyrTg liefern identische Werte. T-15 und T-30 werden aus dem Einpassen einer Geraden in die Abfallkurve der Empfänger in den Intervallen -5dB bis -20dB bzw. -5dB bis -35dB gewonnen. Obwohl normalerweise die T-30 die beste Schätzung für die Nachhallzeit liefern sollte, ist hier zu erkennen, dass die T-30 stark von den anderen Werten für die Nachhallzeit abweicht. T-15 liefert hier die besseren Werte, was darauf zurückzuführen ist, dass CATT-Acoustic nur mit einer maximalen ray-truncation-time, also die Zeit nach der die Strahlenverfolgung abbricht, von 20s arbeitet. Die Nachhallzeiten im Hallraum überschreiten diese Grenze im tieffrequenten

Bereich jedoch bei weitem, d.h. dass der Schätzung der T-30 vor allem in diesem Frequenzbereich immer mit größter Vorsicht zu begegnen ist. In Tabelle 1.7 sind die Ergebnisse dieser Simulation noch einmal mit Zahlenwerten zusammengefasst (die Werte entsprechen dem Mittelwert aller Empfängerpositionen), am Beispiel der Quellposition 3.

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	Kommentar
MFP [m]	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	
T-15 [s]	16,50	16,21	10,27	8,33	5,52	3,59	(LS-fit -5 to -20 dB)
T-30 [s]	21,52	16,48	10,25	8,32	5,51	3,58	(LS-fit -5 to -35 dB)
EyrT [s]	16,13	16,09	10,19	8,28	5,47	3,55	(MFP, AbsC)
EyrTg[s]	16,13	16,09	10,19	8,28	5,47	3,55	(MFP, AbsCg)
SabT [s]	16,15	16,11	10,22	8,30	5,50	3,57	(Vact, Sact, AbsCg)
AbsC [%]	0,9	0,8	1,2	1,3	1,8	2,3	(based on tracing)
AbsCg[%]	0,9	0,8	1,2	1,3	1,8	2,3	(area-proportional)

**Tabelle 1.7:** Übersicht der verschiedenen Nachhallzeiten aus der Simulation mit Segelflächen

In dieser Tabelle steht MFP für „mean free path“, also für die mittlere freie Wegstrecke. Vact und Sact stehen für das Volumen bzw. für die Oberfläche des simulierten Raumes (Vact beträgt ca. 243m<sup>3</sup> und Sact beträgt ca. 240m<sup>2</sup>). LS heißt ‚least squares‘ und bezeichnet den Algorithmus mit dem die Nachhallgeraden an die Abklingkurve angepasst werden. Tabelle 1.8 zeigt die Werte noch mal für drei verschiedene, zufällig ausgewählte Empfängerpositionen, um das Fehlen einer Ortsabhängigkeit, wie sie in den Messungen zu finden ist, deutlich zu machen. Auch die verschiedenen Positionen der Quelle wirken sich in der Simulation nicht so deutlich wie in der Messung aus, was in Abbildung 1-87 auch zu erkennen ist.

T-15 [s]						
Empfänger	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
01	16,51	16,23	10,28	8,34	5,52	3,58
29	16,52	16,22	10,28	8,34	5,52	3,58
70	16,50	16,20	10,26	8,33	5,52	3,59
T-30 [s]						
01	21,38	16,40	10,26	8,32	5,51	3,57
29	21,64	16,48	10,25	8,32	5,51	3,58
70	21,55	16,52	10,25	8,31	5,51	3,58
$\sigma(T-30)$	0.076	0.041	0.007	0.005	0.004	0.004

**Tabelle 1.8:** Nachhallzeiten T-15 und T-30 und die Standardabweichung  $\sigma$  für drei zufällige Empfängerpositionen (mit Diffusoren)

### 1.3.3 Simulation ohne Segelflächen

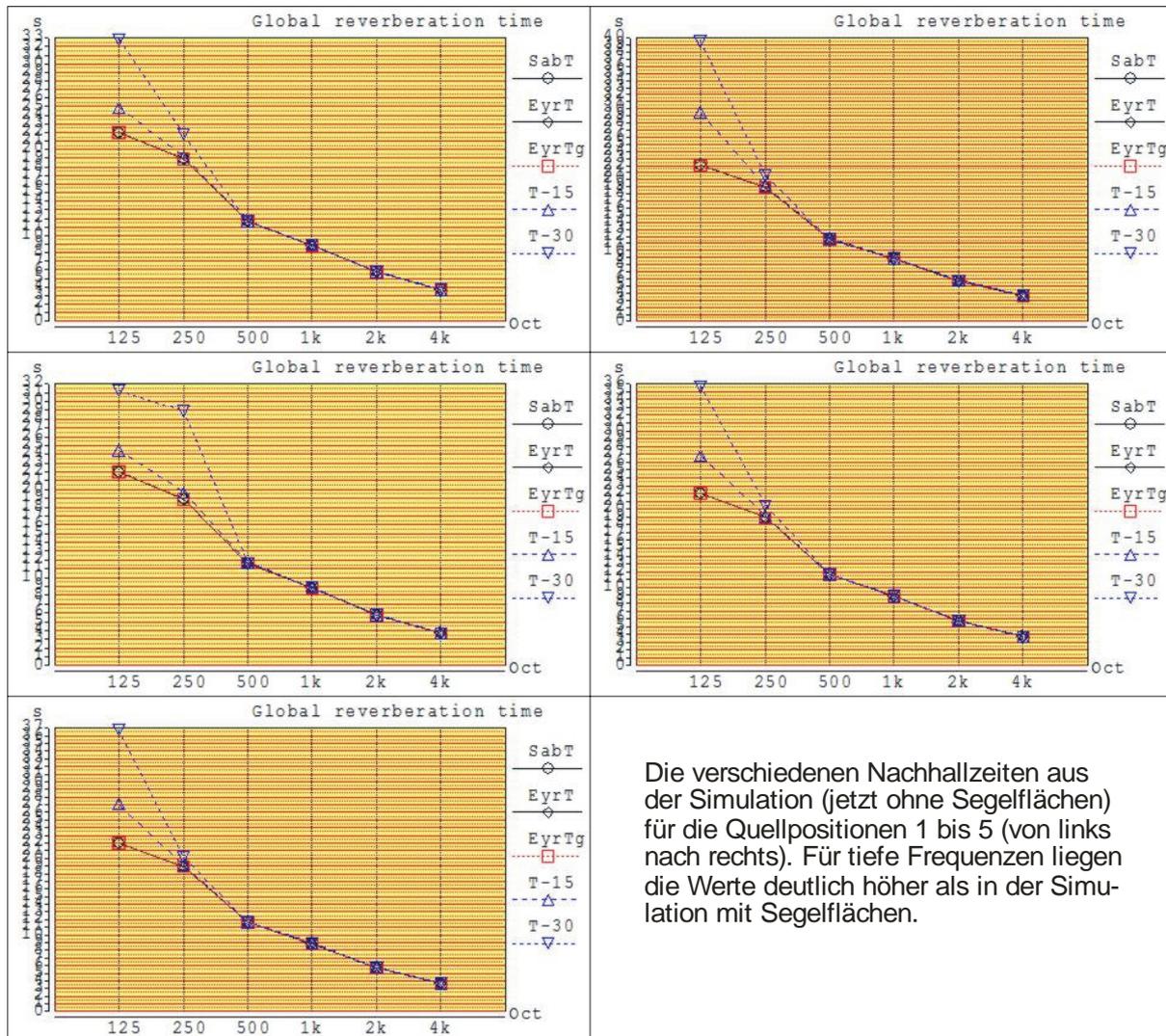


Abbildung 1-88: Die verschiedenen Nachhallzeiten der Simulation ohne Segelflächen

Auch für die Simulation ohne Diffusoren sollen hier noch die errechneten Werte tabellarisch angeführt werden. Tabelle 1.9 entspricht hierbei wieder den über allen Empfängerpositionen gemittelten Werten, Tabelle 1.10 stellt nochmals exemplarisch drei zufällig gewählte Empfängerpositionen gegenüber.

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	Kommentar
MFP [m]	4,07	4,07	4,07	4,07	4,07	4,07	
T-15 [s]	24,44	19,66	11,67	8,92	5,76	3,69	(LS-fit -5 to -20 dB)
T-30 [s]	31,26	28,94	11,65	8,90	5,75	3,68	(LS-fit -5 to -35 dB)
EyrT [s]	22,01	18,92	11,61	8,86	5,72	3,65	(MFP, AbsC)
EyrTg[s]	22,01	18,92	11,61	8,86	5,72	3,65	(MFP, AbsCg)
SabT [s]	22,01	18,92	11,63	8,88	5,75	3,67	(Vact, Sact, AbsCg)
AbsC [%]	0,7	0,8	1,1	1,3	1,9	2,4	(based on tracing)
AbsCg[%]	0,7	0,8	1,1	1,3	1,9	2,4	(area-proportional)

**Tabelle 1.9:** Übersicht der verschiedenen Nachhallzeiten aus der Simulation ohne Segelflächen

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass sich natürlich die mittlere freie Weglänge vergrößert hat, was nicht verwundert, da ja keine „störenden“ Diffusoren mehr im Raum vorhanden sind. Die Nachhallzeiten haben sich auch sehr stark in den unteren beiden Frequenzbändern verändert, was auch mit dem Fehlen der Segelflächen zu begründen ist. Betrachtet man noch mal die Werte der Absorptionskoeffizienten in Tabelle 1.6, so sieht man, dass die Segelflächen in den drei unteren Frequenzbändern einen recht großen Absorptionsgrad aufweisen (Wirkung als Plattenabsorber), zumindest im Vergleich mit allen anderen Absorptionsgraden der Hallraummaterialien. Diese liefern natürlich in der Simulation mit Segelflächen einen wesentlichen Beitrag zum Ergebnis der Simulation.

T-15 [s]						
Empfänger	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
01	24,39	19,67	11,69	8,93	5,76	3,69
29	24,45	19,78	11,68	8,93	5,77	3,68
70	24,51	19,60	11,67	8,91	5,76	3,69
T-30 [s]						
01	31,15	28,89	11,66	8,91	5,75	3,68
29	31,22	29,89	11,66	8,90	5,76	3,68
70	31,31	28,31	11,65	8,90	5,75	3,68
$\sigma(T-30)$	0.102	0.525	0.005	0.007	0.004	0.002

**Tabelle 1.10:** Nachhallzeiten T-15 und T-30 und die Standardabweichung  $\sigma$  für drei zufällige Empfängerpositionen (ohne Diffusoren)

### 1.3.4 Diskussion: Segelflächen

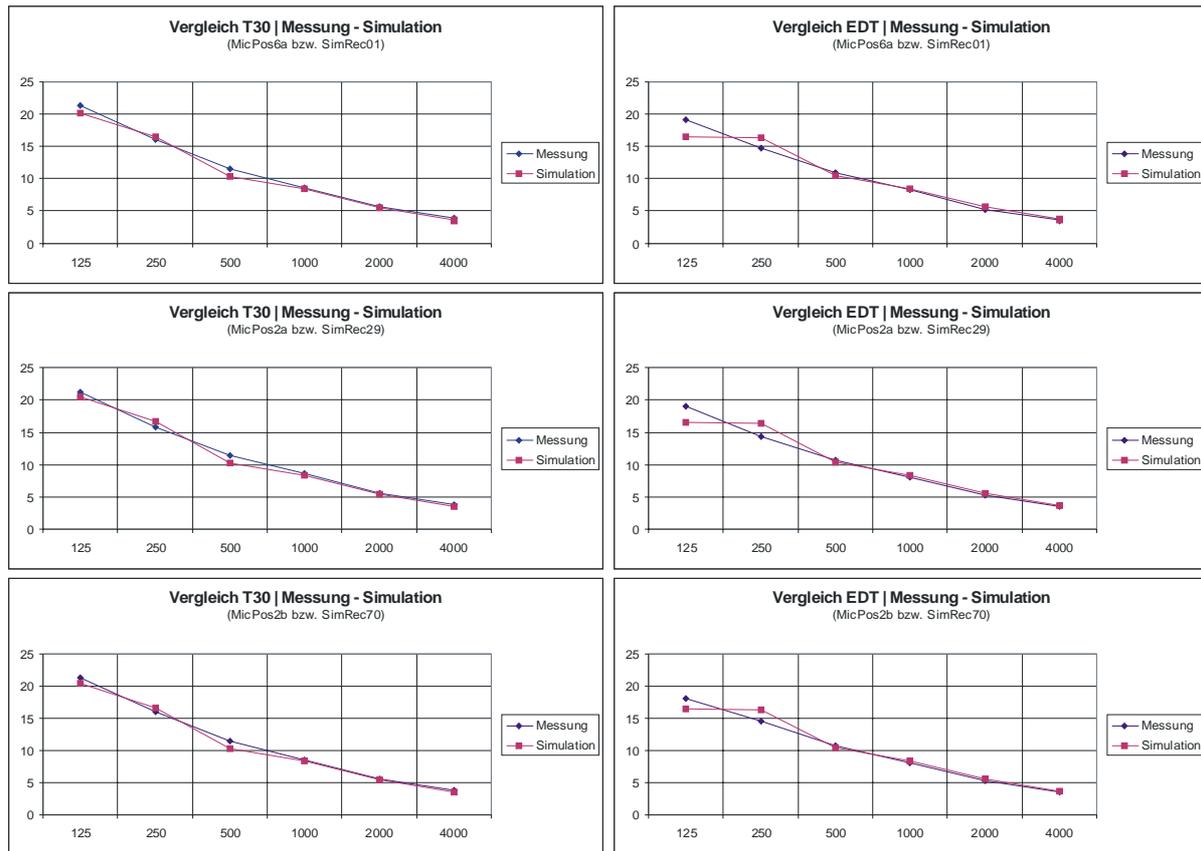
Wie in den letzten beiden Kapiteln gezeigt wurde, kommt es bei der Simulation des Hallraums mit und ohne Segelflächen vor allem im tieffrequenten Bereich zu erheblichen Unterschieden. Andererseits ist die Abweichung bei den Berechnungen zu hohen Frequenzen hin bei weitem nicht so auffällig. Die hohen Werte bei tiefen Frequenzen lassen sich hauptsächlich durch das Fehlen der Segelflächen, die hier auch als Plattenabsorber wirksam sind und durch eine sehr ungehinderte Schallausbreitung erklären, was an der mittleren freien Weglänge deutlich sichtbar ist. Sie beträgt bei der Simulation mit Segelflächen 3,67m und bei der

Simulation ohne Segelflächen 4,07m. Das ist ein Unterschied von mehr als 10%. Der geringere Unterschied bei hohen Frequenzen ist durch zunehmende Anzahl an diffusen Reflexionen in diesem Frequenzbereich zu erklären. An dieser Stelle sei schon darauf hingewiesen, dass die Segelflächen im Hallraum der TU Graz recht hoch angebracht sind, was sich – wie weiter unten in Kapitel 1.5 erläutert wird – ungünstig auswirken kann.

## 1.4 Der Vergleich: Messung vs. Simulation

In Abbildung 1-89 ist nun für die gleichen drei (zufällig ausgewählten) Empfängerpositionen ein direkter Vergleich zwischen der Messung und der Simulation möglich, wobei eine gute Übereinstimmung zu erkennen ist. Das relativiert sich allerdings, wenn man bedenkt, dass die Absorptionskoeffizienten der Simulation für die verschiedenen Materialien im Hallraum - ausgehend von Richtwerten aus der Literatur und des Labors für Bauphysik – so lange angepasst wurden, bis die Nachhallzeiten eine gute Übereinstimmung lieferten.

Eine deutliche Übereinstimmung ist für beide Nachhallzeiten (T30 und EDT) und alle Mikrofonpositionen ab einer Frequenz von 1kHz zu sehen. Darunter weichen Messung und Simulation verschieden stark voneinander ab. Beispielsweise tendiert der Wert für das Frequenzband um 250Hz der Simulation dazu, über dem Wert der Messung zu liegen, während für 125Hz das Gegenteil der Fall ist. Dies ist wieder auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Simulation keine signifikante Ortsabhängigkeit in den Nachhallzeiten liefert, die Werte für die Absorptionskoeffizienten jedoch für andere Mikrofonpositionen an die Messung angenähert wurden. So kommt es, dass die Nachhallzeiten für diese Positionen relativ genau übereinstimmen. Durch die fehlende Ortsabhängigkeit zeigen andere Empfängerpositionen mehr oder weniger starke Abweichungen.



**Abbildung 1-89:** Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand der Nachhallzeiten T30 und EDT für drei verschiedene (zufällig ausgewählte) Empfänger- bzw. Mikrofonpositionen

Wie schon erwähnt, kann die Simulation des Hallraumes einem Vergleich mit detaillierten Messungen nicht standhalten, was vorerst noch auf Unzulänglichkeiten auf Seiten der Simulationsprogramme bzw. auf die heute mögliche Rechenleistung von Computern zurückzuführen ist und im Rahmen dieser Arbeit deutlich erkennbar ist. Einschränkende Faktoren, die auf vereinfachende Annahmen zur Beschränkung des Programmier- und Rechenaufwandes getroffen werden, sind z.B. folgende:

- Beschränkung auf energetische Betrachtungen der Schallausbreitung; der Wellencharakter des Schalles und die damit in Verbindung stehenden Resonanzeffekte in kleinen Räumen werden nicht berücksichtigt.
- Da die Phase des Schalldrucks unberücksichtigt bleibt, können auch die akustischen Verhältnisse vor allem im Nahfeld eines Schallstrahlers nicht korrekt simuliert werden.
- Beschränkung auf ebene Reflexionsflächen, gekrümmte Flächen müssen durch gegliederte ebene Teilflächen realisiert werden.
- Zusammenfassung des Frequenzbereichs in Oktavbänder

Weitere Faktoren, die das Ergebnis entscheidend beeinflussen können, sind die durch den Benutzer einzugebenden Daten der Geometrie und der Absorptions- und Diffusitätseigenschaften. Zum einen können meist nicht alle Details des Raumes in die Modellbildung einbezogen werden, um den Eingabe- und Rechenaufwand in Grenzen zu halten. Zum anderen müssen

die Reflexionseigenschaften aller Oberflächen abgeschätzt werden, da nur in seltenen Fällen verlässliche Daten zur Verfügung stehen<sup>19</sup>.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass man aus der Simulation eine gute Näherung vor allem für die höheren Frequenzbänder, in denen die Resonanzeigenschaften des Raumes, also die Modenbildung, eine nicht mehr so wesentliche Rolle spielen, gewinnen kann. Zu tiefen Frequenzen hin sind die Ergebnisse der Simulation allerdings sehr kritisch zu interpretieren. Aber auch alle Kritik, die in dieser Arbeit an der Simulation geübt wurde, ist richtig zu verstehen, bedenkt man allein die Tatsache, dass es sich hier um die Simulation eines Hallraumes handelt, der natürlich extremste Werte in allen Bereichen liefert. Für Simulationen von Räumen mit kürzeren Nachhallzeiten sind sehr wahrscheinlich genauere und bessere Ergebnisse zu erwarten.

## 1.5 Schlussfolgerungen für den Hallraum der TU Graz

Zum Abschluss des ersten Teiles dieser Arbeit werden hier sowohl die Ergebnisse der Messungen zur genauen Bestimmung des Schallfeldes im Hallraum, als auch die der Simulation des Hallraums mit CATT-Acoustic kurz zusammengefasst.

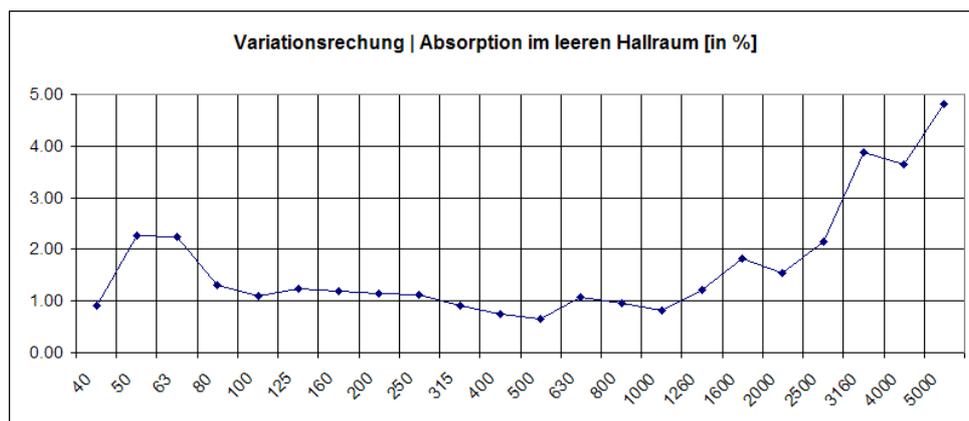
Grundsätzlich ist zu sagen, dass Messergebnisse die in diesem Raum gewonnen wurden, für den oberen Frequenzbereich, also ab etwa 500Hz in jedem Fall Gültigkeit besitzen und als unkritisch betrachtet werden können, unterhalb dieser Frequenz kann durch Mittelung über mehrere Mikrofon- und Quellpositionen ein gültiges Ergebnis erlangt werden. Diese Tatsache deckt sich auch mit der von *Schroeder* postulierten unteren Grenzfrequenz (vgl. Formel 1.14) von  $f_s=458,6\text{Hz}$ , ab der von einem Schallfeld ausgegangen werden kann, das nicht mehr durch Resonanzerscheinungen, sprich Modenbildung, abhängig von der Geometrie des Raumes, beeinflusst wird. In diesem Bereich weist das Schallfeld im Hallraum also genügende Diffusität auf. Unterhalb dieser Frequenz kommt es zu deutlichen Unterschieden in der Messung der Nachhallzeit. Diese Unterschiede sind einerseits abhängig von der Position des Messmikrofons, andererseits auch von der Position der Schallquelle, wie in den vorangegangenen Kapiteln (vgl. Kapitel 1.2.3.1 und 1.2.3.2) gezeigt wurde. Bisher konnten nur Nachhallzeiten miteinander verglichen werden, die im leeren Hallraum gemessen wurden. Diese weichen aber schon stark voneinander ab. Wie stark sich dies in der Bestimmung des Absorptionsgrades auswirkt, wird sich in diesem Kapitel weiter unten noch zeigen. Um im unteren Frequenzbereich weniger Schwankungen in den Ergebnissen zu erhalten, muss die Diffusität im Hallraum verbessert werden. Ein erster und relativ leicht zu bewerkstelligender Ansatz wäre, die Schalldiffusoren etwas tiefer im Raum zu platzieren, da sich diese eher in der oberen Hälfte des Raumes befinden. Die Schallquelle (und auch die Messmikrofone) befinden sich jedoch meist in der unteren Hälfte, was dazu führt, dass der Schall sich im Vergleich zur oberen Hälfte hier eher ungehindert ausbreiten kann. Dies begünstigt natürlich die Modenbildung und somit auch die ungleichmäßige Schalldruckverteilung, was letztendlich die starken Schwankungen in den Nachhallzeiten nach sich zieht.

---

<sup>19</sup> vgl. [BORK 2]

Die Resultate der Simulation sind in diesem Bereich kritisch zu bewerten (vgl. Kapitel 1.3.2 und Kapitel 1.3.3). Es hat sich keine Ortsabhängigkeit des Schallfeldes von verschiedenen Mikrofon- und Quellpositionen ergeben. Ein Vergleich der Simulationen mit und ohne Segelflächen zeigt aber dennoch große Unterschiede in der Nachhallzeit. Diese bestätigen die Schwachstelle des Hallraums der TU Graz. Offensichtlich haben diese Diffusoren sehr großen Einfluss auf die Dauer des Nachhalls, weshalb es günstig wäre, sie auf wirksamere Art und Weise im Raum aufzuhängen. Konkret sollten sie etwas tiefer in den Raum gehängt werden, damit sich die Diffusität schneller auch im unteren Bereich des Raumes einstellen kann.

Die starken Schwankungen in den Nachhallzeiten, die im Schallfeld des TU Graz Hallraums auftreten, wirken sich natürlich auch auf die Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche und somit auch auf die Berechnung des Absorptionsgrades aus. Geht man von einer mittleren Nachhallzeit für jedes Frequenzband aus, wie sie in Abbildung 1-51 gezeigt ist, und bestimmt schon allein die durch die Schwankung der Nachhallzeit entstehende Werte des frequenzabhängigen Absorptionsgrades, so sieht man in Abbildung 1-90, dass selbst ohne Einbringen eines Prüflings eine Absorption von beinahe 5% möglich ist. Diese Tatsache ist natürlich bei der Interpretation der Messergebnisse, wie auch die gesamte Messungenauigkeit zu berücksichtigen. Ausgeglichen kann das durch eine hinreichende Anzahl von Mittelungen über verschiedene Mikrofon- und Quellpositionen werden.



**Abbildung 1-90:** Absorption im leeren Hallraum aus einem Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit der minimalen Nachhallzeit

Schwankungen, die durch andere Faktoren, wie beispielsweise klimatische Bedingungen, verursacht werden, können minimiert werden, in dem die Nullmessung und die Messung mit Prüfling in nur kurzer Zeit hintereinander stattfinden. Es empfiehlt sich, auch die Auswertung der Messung schon vorzubereiten, so dass die ersten Ergebnisse schon vor Ort auf Richtigkeit überprüft werden können. Probleme, die im Rahmen der Messungen für diese Arbeit aufgetreten sind, werden in Kapitel 2.4 genauer beleuchtet und besprochen.

## 2 Mikroperforierte Folienabsorber

### 2.1 Einleitung

Im zweiten Teil dieser Diplomarbeit geht es nun konkret um mikroperforierte Folienabsorber. Nach einem kurzen Überblick über die Motivation zur Entwicklung dieses relativ neuen akustischen Baustoffes, wird die Theorie, die hinter dem Prinzip der Mikroperforation steckt, hergeleitet und es werden mathematische Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die es erlauben, anhand der Folienparameter die Absorptionseigenschaften zu charakterisieren. Der mathematische Hintergrund für die Berechnung des Absorptionsgrades wird dann an vier verschiedenen Berechnungsmethoden gezeigt. Es folgt eine Diskussion der Probleme, die bei den Messungen aufgetreten sind. Anschließend werden die Messungen und deren Ergebnisse besprochen und ausgewertet. Gemessen wurden drei verschiedene Anordnungen mit einer Folie in verschiedenen Wandabständen (10cm, 20cm und 40cm), weiters vier zweischichtige Anordnungen (10cm | 13cm, 10cm | 15cm, 20cm | 30cm und 25cm | 30cm) und schließlich zwei Konfigurationen mit nicht-konstantem Wandabstand (10cm \ 30cm und 10cm \ 30cm | 40cm). Eine Reihe von Beispielen, wie und wo mikroperforierte Folien oder Platten eingesetzt werden, soll die Arbeit mit einem Blick auf die Praxis abrunden.

#### 2.1.1 Motivation

Die Bekämpfung des Lärms technischer Schallquellen ist zu einem zentralen Anliegen des Umweltschutzes geworden. Für lärmindernde Maßnahmen an der Quelle, auf dem Ausbreitungswege und am Immissionsort stehen leistungsfähige Mess-, Rechen- und Auslegungsverfahren sowie zahlreiche Bauelemente von Schalldämpfern und -kapseln bis hin zu persönlich am Ohr zu tragendem Gehörschutz zur Verfügung. Lediglich bei der Dämmung und Dämpfung der tieffrequenten Geräuschanteile gibt es noch Entwicklungsbedarf für kostengünstige und raumsparende Lösungen und Produkte. In einem mit weiter wachsender Technisierung und Motorisierung, sowie absichtsvoller Beschallung offenbar unvermeidbar immer lauterem Umfeld, ist daher das Lärmproblem stark angeschwollen.

Dieses Problem hat unmittelbar mit der heute vorherrschenden architektonischen Gestaltung und der üblich gewordenen Bautechnik zu tun. Der Trend zu immer mehr Glas, Beton und Naturstein in Wänden, Decken und Böden ist ungebrochen. Auch der Innenausbau kennt kaum noch faserige oder poröse Materialien, die z.B. in der Form von Teppichen, Vorhängen, Akustik-Decken und -Putzen oder Polster-Möbeln für etwas Dämpfung im Raum sorgen könnten. Stattdessen erfreuen sich glatte, geschlossene Oberflächen, die klinisch sauber blei-

ben bzw. leicht zu reinigen sind, zunehmender Beliebtheit. Nachdem im Zuge einer immer weiter um sich greifenden Bauteil-Aktivierung für Kühlung und Heizung jede thermische Isolierung an den Raumbegrenzungen verpönt ist, haben es die akustischen Berater schwer, überhaupt noch Flächen zu finden, vor denen sie konventionelle Akustik-Materialien anzubringen empfehlen können. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Lärmschutz und akustische Behaglichkeit insbesondere in Räumen für kommunikationsintensive Tätigkeiten im Arbeits- wie im Freizeitbereich.

Um so wichtiger wäre es, dass man die Hörsamkeit (die „Akustik“) nicht nur in großen Sälen für hochwertige Musik- und Sprachdarbietungen, sondern auch in kleinen und mittleren Räumen für kommunikationsintensive Nutzungen aller Art durch den Einbau geeigneter Akustik-elemente für den jeweils vorgesehenen Gebrauch optimal einstellt. Will man in allen der Kommunikation dienenden Räumlichkeiten nicht nur ein angemessenes Raumklima, sondern auch eine angenehme Raumakustik schaffen, so kann man dies zeitgemäß nur mit kompakt bauenden Modulen mit glatten, harten und geschlossenen Oberflächen erreichen, die an Decken und Wänden, sowie in Nischen (z.B. hinter Heizkörpern) wie andere Design-Elemente und technische Gebäudeausrüstungen auch im Innenausbau integriert werden können. Hier haben Entwicklungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP) Möglichkeiten geschaffen, das akustische Ambiente allen kommunikativen Ansprüchen anzupassen, ohne dass man zu den faserigen, porösen Dämpfungsmaterialien hinter Folien, Vliesen und Lochabdeckungen zurückkehren muss. Hier haben sich die mikroperforierten Flächengebilde aus den unterschiedlichsten Materialien ohne jede weitere Auflage bewährt.

## 2.1.2 Mikroperforierte Flächengebilde

Großflächige Bauteile aus Metall, Holz oder Kunststoff, die mit einer Vielzahl sehr kleiner (bevorzugt <1mm) Löcher versehen sind, die dem Schall mit nur einigen Prozent offen stehen, können über 80% der einfallenden Schallenergie schlucken. Diese oft auch als ALFA-Bauteile (alternative faserfreie Absorber) bezeichneten Schallabsorber sind natürlich für alle Informations- und Kommunikations-Arbeitsplätze, Präsentationsräume und Empfangshallen besonders attraktiv, zeichnen sie sich primär durch eine gute Schallabsorption und sekundär durch beispielsweise leichte Montage und gute Reinigungsfähigkeit aus. Vor Fenstern und Fassaden haben sich vielfach schon mikroperforierte Vorsatzschalen aus Acrylglas bestens bewährt (siehe hierzu auch das Kapitel 2.8). Da die Luft in den nur 0,2 bis 0,8mm kleinen Löchern pulsiert, setzen sich diese auch in rauher Umgebung nicht zu. Mit kaum 0,1mm dicken, noch feiner mikroperforierten Kunststoff-Folien, die nach Bedarf transparent, transluzent farbig oder bedruckt geliefert werden können, lassen sich z.B. hochabsorbierende Rollos vor Fensterflächen oder Bespannungen von Raumteilern anfertigen<sup>20</sup>.

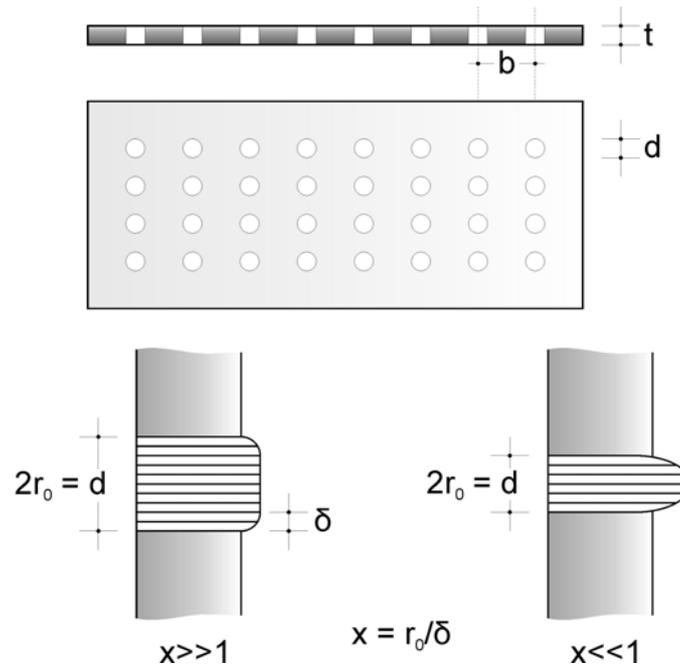
## 2.2 Theoretischer Hintergrund

Lochplatten mit grober Perforation werden häufig als Abdeckung von porösen oder faserigen Schallabsorbern vor schallharten Wänden eingesetzt, es entsteht mit dem Volumen hinter der

---

<sup>20</sup> vgl. [FUCHS 1] und [FUCHS 2]

Lochplatte (Feder) und dem Inhalt des Loches (Masse) ein gedämpftes Masse-Feder-System, so dass Schallabsorption möglich ist. Macht man die Löcher nun kleiner als 1mm, so erreicht man ein Masse-Feder-System, das in den Löchern so viel viskose Reibung zu überwinden hat, dass keine additive Absorption im Luftzwischenraum mehr nötig ist, das heißt, dass das Volumen hinter der perforierten Platte oder Folie nicht mehr mitbenutzt werden muss<sup>21</sup>. Ein zweites Material, wie es bei herkömmlichen Lochplattenabsorbern in Form faseriger oder poröser Werkstoffe üblich ist, ist also nicht notwendig.



**Abbildung 2-1:** Prinzip der mikroperforierten Absorber  
oben: schematische Ansicht eines perforierten Absorbers  
unten: Geschwindigkeitsverteilung von Luftschichten in zylindrischen Öffnungen unterschiedlichen Durchmessers<sup>22</sup>

Die Theorie für poröse Absorber basiert auf *Rayleighs* Modell<sup>23</sup>. Mit dem auf die akustische Grenzschichtdicke ( $\delta$  in Abbildung 2-1) bezogenen Lochradius  $r_0$ ,

$$x = \frac{r_0}{\sqrt{\eta/\rho_0\omega}} = 0,65 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f}$$

**Formel 2.1:** Akustische Grenzschichtdicke auf Lochradius  $r_0$  bezogen

wobei  $\eta$  die (dynamische) Viskosität,  $\rho_0$  die Dichte der Luft ist und  $\omega$  für  $2\pi f$  steht, lässt sich die zuerst von *Crandall*<sup>24</sup> angegebene Impedanz einer in ihrer Länge  $t$  klein gegenüber der Wellenlänge  $\lambda$  angenommenen Bohrung schreiben als

<sup>21</sup> vgl. [FUCHS 3] und [FUCHS 4]

<sup>22</sup> vgl. [FUCHS 3]

<sup>23</sup> vgl. [RAYLEIGH]

$$Z_0 = j\omega\rho_0 t \left[ 1 - \frac{2}{x\sqrt{-j}} \cdot \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x\sqrt{-j})} \right]^{-1}$$

**Formel 2.2:** Impedanz einer Bohrung (Länge  $t < \lambda$ ), nach Crandall

wobei  $J_0$  und  $J_1$  die Bessel-Funktionen nullter bzw. erster Ordnung sind. Betrachtet man nun die beiden Grenzfälle, in denen der auf die akustische Grenzschicht normierte Lochradius viel kleiner bzw. größer als 1 wird, so erhält man

$$Z_0 = 8 \frac{\eta t}{r_0^2} + \frac{4}{3} j\omega\rho_0 t \quad \text{für } x \ll 1$$

$$Z_0 = \sqrt{2} \frac{\eta t}{r_0^2} x(1+j) + \frac{4}{3} j\omega\rho_0 t \quad \text{für } x \gg 1$$

**Formel 2.3:** Impedanzen einer Bohrung für die Grenzfälle  $x \ll 1$  und  $x \gg 1$

Die Theorie der mikroperforierten Absorber als eigenständige Schallabsorber kommt aber von *Maa* (ca. 1975), der die Impedanz  $Z'$  (mit dem Kennwiderstand der Luft  $\rho_0 c_0$  normiert) einer Lochplatte mit zylindrischen Löchern (Lochanteil  $\sigma$ ) im Abstand  $D$  vor schallharter Wand herleitete.

$$Z' = \frac{Z_0}{\rho_0 c_0} \cdot \frac{1}{\sigma} + \frac{Z_D}{\rho_0 c_0} = r' + j \left( \omega m' - \cot \frac{\omega D}{c_0} \right)$$

**Formel 2.4:** Impedanz einer Lochplatte mit zylindrischen Löchern (nach *Maa*)

Gegenüber dem einfachen Masse-Feder-System beschreibt der  $\cot(\omega D/c_0)$ -Term in Formel 2.4 die Tatsache, dass für die hier angestrebten relativ breitbandig wirksamen mikroperforierten Absorber der Hohlraum zwischen Lochplatte und Wand für höhere Frequenzen genau genommen einen Hohlraum-Resonator darstellt. Für  $D=\lambda/4$  würde dieser bei nicht zu großen Werten der flächenbezogenen, mit  $\rho_0 c_0$  normierten Masse der in den Löchern schwingfähigen Luft ein entsprechend  $r'$  gedämpftes Schwingungsmaximum zulassen. Andererseits wird  $-j \cot(\omega D/c_0)$  für  $D=\lambda/2$  unendlich groß, so dass bei der entsprechenden Frequenz ebenso wie bei ganzzahligen Vielfachen derselben kein Mitschwingen und daher, im Rahmen dieses Modells, auch keine Absorption möglich ist, da die Näherung in Fußnote 25 nur für sehr kleine Frequenzen gilt. Aus diesem Grund tendiert die Frequenz des Absorptionsmaximums gegenüber einer wie auch immer gearteten Grobabschätzung zu etwas niedrigeren Frequenzen.

Der Hauptunterschied zum konventionellen Helmholtz-Resonator steckt in der über  $x$  stark frequenzabhängigen Form von  $r'$  und  $m'$ .

<sup>24</sup> vgl. [CRANDALL]

$$m' = \frac{t}{c_0 \sigma} + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 1,7 \frac{r_0}{t} = \frac{t}{c_0 \sigma} \cdot K_m$$

$$r' = \frac{8\eta}{\rho_0 c_0} \cdot \frac{t}{\sigma_0^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{r_0}{t} x = \frac{8\eta}{\rho_0 c_0} \cdot \frac{t}{\sigma_0^2} \cdot K_r$$

**Formel 2.5:**  $r'$  und  $m'$  mit den Mündungskorrekturen  $K_m$  bzw.  $K_r$  (mit  $t$  und  $r_0$  in mm)

Darin sind der dritte Summand in  $m'$  ( $m'$  ist die normierte Masse) sowie der zweite Summand in  $r'$  unschwer als „Mündungskorrektur“ zu erkennen. Für den Fall, dass es sich bei dem absorbierenden Material um ein gut wärmeleitendes Material handelt, führt  $Maa$  im Grenzschicht-Parameter  $x$  (vgl. Formel 2.1) zur Viskosität mit dem Wert  $1,8 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}\cdot\text{s}$  noch zusätzliche Verluste mit dem Wert  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}\cdot\text{s}$  ein, so dass

$$x_1 = 0,65 r_0 \sqrt{f} \text{ ohne und}$$

$$x_1 = 0,42 r_0 \sqrt{f} \text{ mit Wärmeleitung}$$

in die obigen Gleichungen (Formel 2.5) einzusetzen sind. Dann lautet die Zahlenwert-Gleichung für  $r'$  (beim mikroperforierten Absorber also genau bestimmbar):

$$r'_1 = 0,34 \cdot 10^{-3} \frac{t}{\sigma_0^2} \cdot K_r \text{ (ohne) bzw. } r'_2 = 0,78 \cdot 10^{-3} \frac{t}{\sigma_0^2} \cdot K_r \text{ (mit Wärmeleitung)}$$

In Analogie zum einfachen Masse-Feder-System lassen sich die mikroperforierten Absorber hinsichtlich ihrer Haupt-Resonanzfrequenz und ihres normierten Kennwiderstandes charakterisieren, schätzt man den vom Frequenzbereich der Auslegung abhängigen Korrekturfaktor  $K_m$  nach Formel 2.5 ab und setzt alle Maße in mm ein<sup>25</sup>:

$$f_{MPA} = 54 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\sigma}{Dt \cdot K_m}} \text{ in [Hz]}$$

**Formel 2.6:** Haupt-Resonanzfrequenz eines mikroperforierten Absorbers

$$Z'_{MPA} = \sqrt{\frac{tK_m}{D\sigma}}$$

**Formel 2.7:** Normierter Kennwiderstand (dimensionslos) eines mikroperforierten Absorbers

Aus dem Verhältnis  $(r'+1)/Z'_{MPA}$  lässt sich eine Aussage über die relative Bandbreite des jeweiligen mikroperforierten Absorbers treffen. Der Zusammenhang mit dem Absorptionsgrad ist über die Impedanz bzw. den Reflexionsfaktor  $R$  gegeben.

<sup>25</sup> mit der Näherung  $\cot(\omega D/c_0) \cong c_0/\omega D$

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

**Formel 2.8:** Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad  $\alpha$  und Reflexionsfaktor  $R$

Für senkrechten Schalleinfall ist der Reflexionsfaktor  $R$  dann

$$R = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}$$

**Formel 2.9:** Reflexionsfaktor  $R$  bei senkrechtem Schalleinfall

Dabei ist  $Z_0$  die Luftkennimpedanz (mit  $413 \text{ Nsm}^{-3}$ ) und  $Z_A$  die Impedanz des Absorbers. Bei schrägem Schalleinfall hängt der Reflexionsgrad auch noch vom Einfallswinkel  $\Phi$  gegenüber der Normalen ab.

$$R = \frac{Z_A - Z_0 / \cos \Phi}{Z_A + Z_0 / \cos \Phi}$$

**Formel 2.10:** Reflexionsfaktor  $R$  bei schrägem Schalleinfall

Mit diesem Wissen ist es möglich, solche Absorber ganz gezielt einsetzen zu können.

Für die Folien allein, die bei den Messungen im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden, ergeben sich die in Tabelle 2.1 dargestellten theoretischen Werte. Die Parameter der Folie sind mit einem ungefähren Lochdurchmesser von 0,2mm, einem Lochabstand von 2mm, also einem Lochflächenanteil von ca. 0,79% und einer Foliendicke von 0,1mm gegeben.

Frequenz in [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsgrad $\alpha$ in [%]	2,1	2,2	2,4	2,8	3,6	5,3	9,0

**Tabelle 2.1:** Die theoretisch berechneten Werte der Absorptionsgrade für die Folienabsorber

## 2.3 Berechnung des Absorptionsgrades

In diesem Abschnitt werden verschiedene Herangehensweisen zur Berechnung des Absorptionsgrades aus Hallraummessungen beschrieben. Die Norm geht natürlich davon aus, dass über die vorgeschriebene Anzahl von Messungen gemittelte Werte in die jeweiligen Formeln eingesetzt werden. *Powell*<sup>26</sup> geht einen Schritt weiter und vergleicht verschiedene Berechnungsmethoden miteinander. Diese Ergebnisse werden hier beleuchtet und kurz zusammengefasst.

<sup>26</sup> vgl. [POWELL]

### ***Berechnung nach der Norm***

Hier wird der Absorptionsgrad aus dem Quotienten aus äquivalenter Schallabsorptionsfläche  $A$  des Prüfmateri als und der Fläche des Prüfmateri als  $S_1$  berechnet.

$$\alpha_{s,N} = \frac{A}{S_1}$$

**Formel 2.11:** Absorptionsgrad nach Norm EN 20354 (gekennzeichnet durch Index  $N$ )

Die hierfür notwendige äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$  berechnet sich nach

$$A = 55,3 \cdot \frac{V}{c} \cdot \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right)$$

**Formel 2.12:** Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Darin ist  $V$  das Volumen des Hallraums,  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit (abhängig von der Raumtemperatur, vgl. Formel 1.2),  $T_s$  die Nachhallzeit nach Einbringen des Prüfmateri als und  $T_0$  die Nachhallzeit des leeren Raumes. Bei üblichen Absorptionsmaterialien ergibt sich ein kleiner Fehler im berechneten Wert infolge der Vernachlässigung der Absorption der mit Prüfmateri als bedeckten Fläche. Der berechnete Wert ist etwas zu niedrig. Sicherlich würde jedoch ein größerer Fehler entstehen, wenn der Absorptionsgrad der bedeckten Fläche aus der Nachhallzeit des leeren Hallraums berechnet würde. Denn diese Nachhallzeit hängt nicht nur von der Absorption der Raumboberflächen ab, sondern wahrscheinlich mehr von der der anderen Objekte (wie Türen, Lautsprecher, Beleuchtungskörper), außerdem von der Schalldämpfung in Luft und von Schwingungen der Wände und der Decke, die durch das sie bedeckende Absorptionsmaterial nicht verhindert werden.

### ***Berechnung nach Sabine***

Die Berechnung des Absorptionsgrades nach Sabine ist die wohl am häufigsten herangezogene Berechnungsart und ist im Grunde genommen auch für die Berechnungsmethode der Norm, wie im vorigen Unterabschnitt gezeigt, die Grundlage. Der Absorptionsgrad berechnet sich explizit nach folgender Formel.

$$\alpha_{s,S} = \frac{0,161 \cdot V}{S_1} \left[ \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \left( 1 - \frac{S_1}{S_0} \right) \right]$$

**Formel 2.13:** Absorptionsgrad nach Sabine (gekennzeichnet durch Index  $S$ )

$S_0$  ist hier die Fläche des Hallraums. Hier wird von einer konstanten Schallausbreitungsgeschwindigkeit von  $c = 344 \text{ms}^{-1}$  ausgegangen, welche nur noch im Faktor 0,161 latent vorhanden ist (vgl. dazu auch Formel 1.7 und Formel 1.8). Normalerweise ist der Absorptionsgrad  $\alpha_0$  des leeren Raumes bekannt, dann kann Formel 2.13 auch folgendermaßen angeschrieben werden.

$$\alpha_{s,S} = \alpha_{0,S} + \frac{0,161 \cdot V}{S_1} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right), \text{ dabei ist } \alpha_{0,S} = \frac{0,161 \cdot V}{S_0 T_0}$$

Für den Fall eines stark absorbierenden leeren Raumes kann  $\alpha_{0,S}$  größer als 1 werden, was physikalisch natürlich nicht möglich ist. Dies passiert, wenn  $T_0$  kleiner als  $0,161V/S_0$  wird, tatsächlich strebt  $\alpha_{0,S}$  gegen Unendlich, wenn  $T_0$  gegen Null geht. Wie im ersten Teil (vgl. Kapitel 1.1.2.2) schon erwähnt zeigt dies, dass die Berechnung nach *Sabine* nur für kleine Absorptionsgrade Gültigkeit besitzt.

Im Gegensatz zur Berechnung des Absorptionsgrades nach der Norm wird hier keine Vernachlässigung der Absorption der mit Prüfmaterial bedeckten Fläche vorgenommen (vgl. dazu den Term  $(1-S_1/S_0)$  in Formel 2.13).

### ***Berechnung nach Norris-Eyring***

Diese Methode wurde entwickelt, um die Unzulänglichkeiten der *Sabine*'schen Berechnung wettzumachen, wie zum Beispiel das Auftreten von Absorptionswerten, die größer sind als 1, und lautet

$$\alpha_{s,E} = \alpha_{0,E} + \frac{S_0}{S_1} \left[ e^{\left( \frac{0,161 \cdot V}{S_0 T_0} \right)} - e^{\left( \frac{0,161 \cdot V}{S_0 T_s} \right)} \right], \text{ mit } \alpha_{0,E} = 1 - e^{\left( \frac{0,161 \cdot V}{S_0 T_0} \right)}$$

**Formel 2.14:** Absorptionsgrad nach *Norris-Eyring* (gekennzeichnet durch Index *E*)

Dabei ist  $\alpha_{0,E}$  der Absorptionsgrad des leeren Raumes.

### ***Berechnung nach Millington und Sette***

Die vierte Gleichung zur Berechnung des Schallabsorptionsgrades, weniger oft zu finden, ist die Folgende:

$$\alpha_{s,M} = 1 - \left( 1 - \alpha_{0,M} \right) \cdot e^{\left[ -\frac{0,161 \cdot V}{S_0} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}, \text{ mit } \alpha_{0,M} = 1 - e^{\left( \frac{0,161 \cdot V}{S_0 T_0} \right)}$$

**Formel 2.15:** Absorptionsgrad nach *Millington und Sette* (gekennzeichnet durch Index *M*)

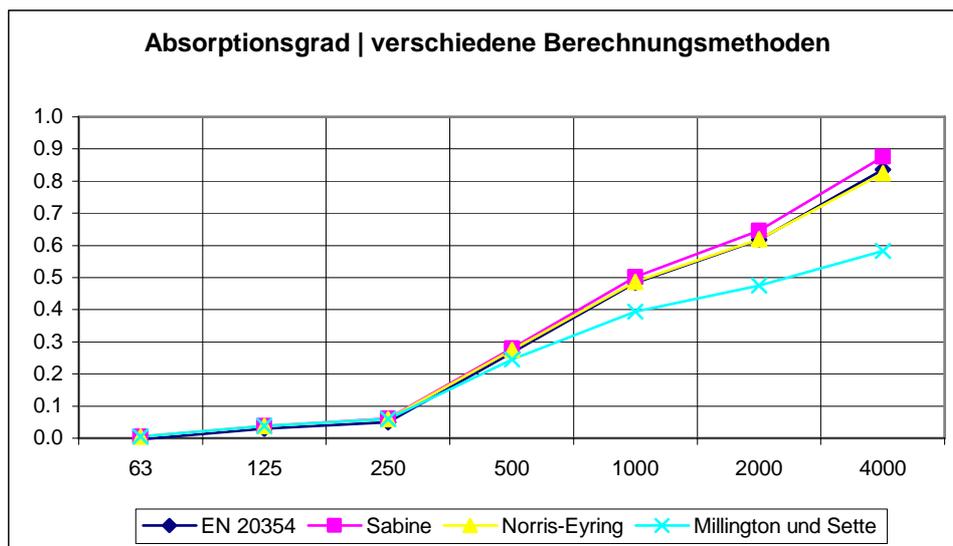
Während die Berechnung nach *Sabine* nicht ausreichend für große Absorptionsgrade ist, da hier Werte größer als 1 möglich sind, nähern sich die Berechnungen nach *Norris-Eyring* und *Millington und Sette* asymptotisch an 1 an. Die Verschiedenheit der Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsmethoden kommt daher, dass der Abfall der Schallenergie im Raum auf unterschiedliche Art und Weise angenommen wird. *Sabine* geht von einem kontinuierlichen Abfall aus, die beiden letzten nehmen jedoch an, dass die Absorption ein nicht-kontinuierlicher Prozess ist. Absorption findet also nur an den reflektierenden Flächen statt, nicht aber im ganzen Raum, was eigentlich die korrektere Herangehensweise ist, da der Anteil des Schalles, der in der Luft absorbiert wird, nicht berücksichtigt wird. Der Ansatz von *Eyring* geht von kompletter Diffusität des Schallfeldes aus, während *Millington und Sette* in ihrem Ansatz keine Divergenz der Schallstrahlen zulassen. Aus diesem Grund liefert letzterer besonders dann gültige Ergebnisse, wenn man von normal einfallenden, nicht-divergenten Wellen ausgeht, was vor allem dann der Fall ist, wenn gerade eine Fläche im Hallraum hoch absorbierend ist (zum Beispiel auch für Anwendungen in einer Röhre, die dann quasi als Hallraum zu interpretieren ist). Ist die Bedingung der Diffusität erfüllt und vernachlässigt man dann noch Kanteneffekte, liefert die *Eyring*'sche Berechnung die besten Ergebnisse. *Sabines*

Ansatz gilt vor allem dann, wenn Messungen in Hallräumen vorgenommen werden, in dem das Einbringen des absorbierenden Materials keinen großen Einfluss auf die Nachhallzeit hat, also für kleine Absorptionskoeffizienten. Der mathematische Unterschied in den verschiedenen Berechnungsmethoden ist, dass *Millington* und *Sette* eine bei der Herleitung eine geometrische Summe, *Eyring* allerdings eine arithmetische Summe benutzt. Die *Sabine*'sche Methode entsteht aus einer Näherung der Methode nach *Eyring*.

Ein abschließendes Berechnungsbeispiel: In Tabelle 2.2 sind die Ergebnisse der vier unterschiedlichen Berechnungsmethoden am Beispiel der Mikrofonposition 5 der zweilagigen Anordnung gegenübergestellt (Abstände 10cm bzw. 15cm). Die grafische Auswertung ist in Abbildung 2-2 zu sehen.

	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Norm	-0.00362	0.03044	0.05040	0.26673	0.48408	0.61744	0.83533
Sabine	0.00434	0.03832	0.06097	0.28045	0.50188	0.64500	0.87555
Norris-Eyring	0.00433	0.03803	0.06032	0.27493	0.48734	0.61845	0.82492
Millington und Sette	0.00433	0.03760	0.05915	0.24455	0.39461	0.47534	0.58337

**Tabelle 2.2:** Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden des Absorptionsgrades



**Abbildung 2-2:** Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden des Absorptionsgrades

Während die Berechnung nach der Norm und der *Norris-Eyring*-Ansatz nahezu gleiche Ergebnisse liefern, liegt der Absorptionsgrad aus der *Sabine*'schen Rechnung etwas darüber, der nach *Millington* und *Sette* darunter, vor allem zu hohen Frequenzen hin. Für die weiteren Auswertungen werden daher die Berechnung nach der Norm und die nach Norris-Eyring herangezogen. Wenn auch hier nicht alle Ergebnisse dargestellt sind, so sind sie doch auf der CD im Anhang zu finden.

## 2.4 Probleme

Bevor anschließend die Messergebnisse ausgewertet und besprochen werden, sollen hier die Probleme beschrieben werden, die bei den Messungen aufgetreten sind. Natürlich geht es hier weniger um Probleme des Audio-Alltags wie etwa Brummen auf den Lautsprechern, sondern viel mehr um die Probleme, die sich stark auf die Messergebnisse auswirken, deren Ursache aber nicht genau bestimmbar ist. Konkret bedeutet das, dass die Messergebnisse für den leeren Hallraum an drei verschiedenen Tagen (23. Juli 2004, 22. November 2004 und 01. und 02. Dezember 2004) drei verschiedene Ergebnisse liefern, was in Abbildung 2-3 für Mikrofonposition 1 und in Abbildung 2-4 für Mikrofonposition 2 veranschaulicht wird. Die Graphen zweier Messungen (identische Einstellungen, also gleiche Mikrofonposition, gleiche Quellposition usw.) an einem Tag sind jedoch deckungsgleich und äußerst konsistent.

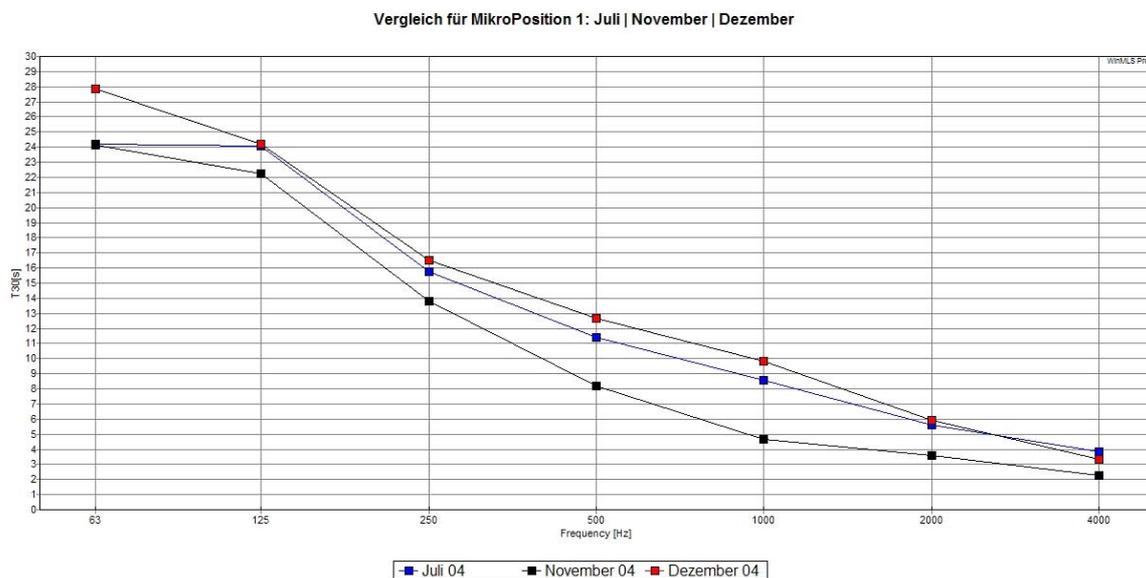
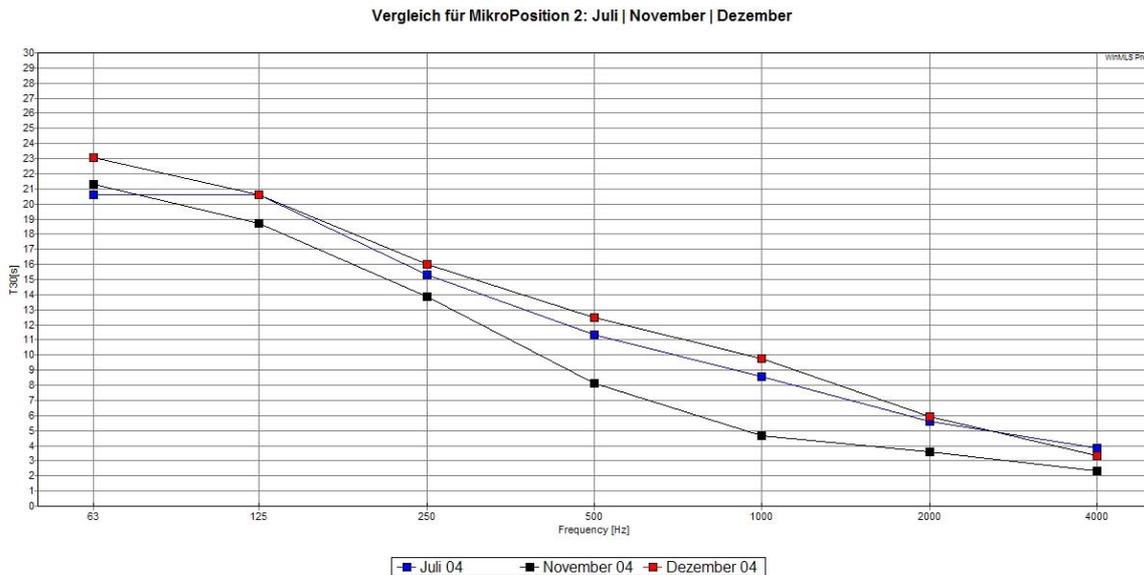
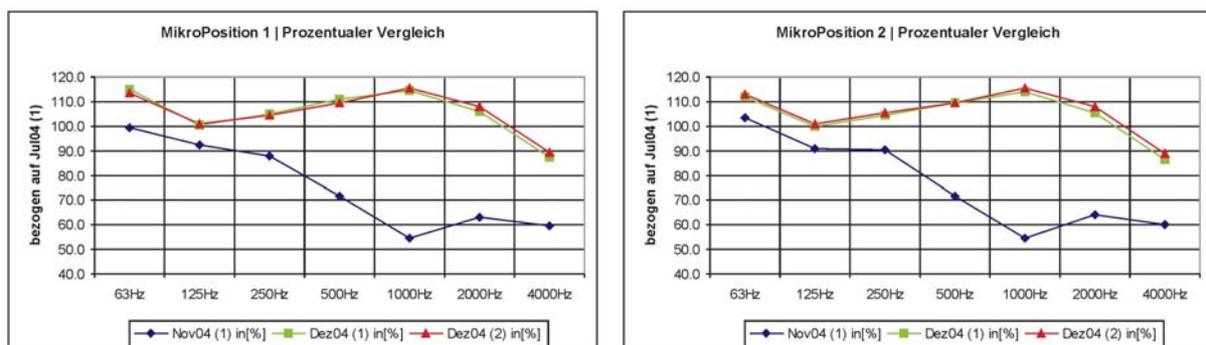


Abbildung 2-3: T30-Messergebnisse an drei verschiedenen Tagen (Mikrofonposition 1)



**Abbildung 2-4:** T30-Messergebnisse an drei verschiedenen Tagen (Mikrofonposition 2)

Es ist also deutlich zu erkennen, dass im November wesentlich niedrigere Nachhallzeiten im leeren Hallraum gemessen wurden als im Juli. Nach dem Auffallen dieser Tatsache wurde eine weitere Messung durchgeführt (Dezember 04), bei der ausgeschlossen werden sollte, dass die niedrigen Werte im November durch einen Benutzerfehler zustande gekommen sind. Aus diesem Grund wurden in dieser Messung verschiedenste Arten von Fehlern simuliert, die durch den Benutzer gemacht werden könnten, angefangen mit dem Vertauschen von Mikrofonen über die verschiedenen Mikrofonpositionen, über Drehen der Lautsprecher und willkürliche Einstellungen am Vorverstärker-, A/D- Wandler (Swissonic AD8) bis hin zu diversen Einstellungen in der Messsoftware WinMLS2004 selbst. Diese Messungen haben allerdings gezeigt, dass solche Fehler nur einen vernachlässigbaren Einfluss im Ergebnis haben. Eine vierte Messung am 02. Dezember 2004, bei der der gesamte Messapparat bis auf die Mikrofone, vom Vortag im Hallraum belassen werden konnte, zeigte die gleichen Ergebnisse wie am Tag zuvor. Die Mikrofone wurden über Nacht in den dafür vorgesehenen Behältern aufbewahrt um Kondenswasserbildung auf der Membran zu verhindern und um dem Messsystem quasi einen komplett neuen Tag vorzuspiegeln.

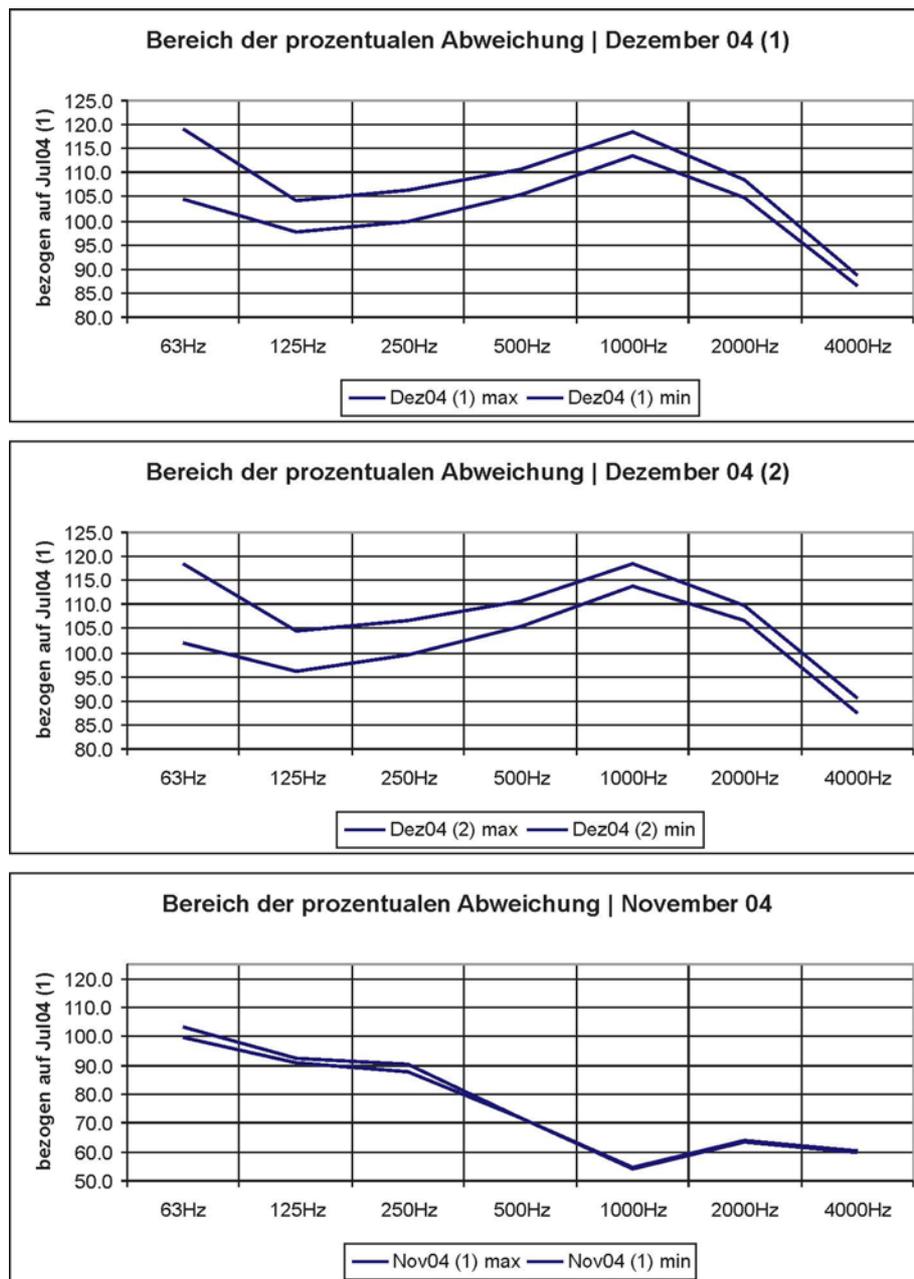


**Abbildung 2-5:** Die prozentuale Abweichung der Ergebnisse November und Dezember (1) von den Ergebnissen im Juli; links für Mikrofonposition 1 und rechts für Mikrofonposition 2

In Abbildung 2-5 ist die prozentuale Abweichung der Messergebnisse im Winter (November und Dezember) des leeren Hallraums von den Messergebnissen im Juli dargestellt. Sehr deut-

lich wird die gute Übereinstimmung der Ergebnisse von 01.12.04 und 02.12.04. Diese beiden Resultate liegen in der unteren Hälfte des gemessenen Frequenzbereiches über den Werten aus der Sommer-Messung. Im Gegensatz dazu, sieht man die erheblichen Abweichungen der November-Messungen. Diese liegen bis zu fast 50 Prozentpunkten unter den Werten der Juli-Messung.

Abbildung 2-6 zeigt noch einmal die Bereiche der prozentualen Abweichungen der verschiedenen Messungen, das heißt, es sind jeweils maximale und minimale Werte zu Graphen verbunden worden. Im tieffrequenten Bereich ist dieser Bereich relativ groß und nimmt zu hohen Frequenzen hin ab. Dies überrascht nicht, sind ja die Ergebnisse im tieffrequenten Bereich ohnehin einer größeren Streuung unterworfen.



**Abbildung 2-6:** Bereiche der prozentualen Abweichung; oben: Messungen vom 01. Dezember 2004; Mitte: Messungen vom 02. Dezember 2004; unten: Messungen vom 23. November 2004

Bei Abbildung 2-6 ist zu beachten, dass die Graphik die Messungen vom Dezember über einen Bereich von sechzehn Mikrofonpositionen darstellt. Die Ergebnisse vom November stammen aber aus bereits erwähnten Gründen nur von Mikrofonposition 1 und Mikrofonposition 2. Daher scheint dieser Bereich generell etwas schmaler als die anderen Bereiche der Dezember-Messungen. Die prozentuale Abweichung der Mikrofonpositionen 3 bis 16 für die Dezember-Messungen ist auf der CD im Anhang zu finden und werden hier der Übersichtlichkeit wegen nicht angeführt, liegen aber im gleichen Bereich wie die dargestellten Werte.

In Tabelle 2.3 werden Temperatur und Luftfeuchtigkeit an den oben genannten Tagen gegenübergestellt.

	22. Juli 2004	23. November 2004	1. Dezember 2004
Temperatur in [°C]	23,5	15	15
Luftfeuchtigkeit in [%]	73	37	44

**Tabelle 2.3:** Temperatur und Luftfeuchtigkeit an den verschiedenen Tagen

Dass die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängt, wurde bereits im ersten Kapitel in Formel 1.2 erwähnt:  $c = 331 + 0,6t$ . Im Sommer war die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Hallraum bei  $345,1\text{ms}^{-1}$  um  $5,1\text{ms}^{-1}$  höher als im Winter bei  $340,0\text{ms}^{-1}$ . Die Abhängigkeit der Absorption von Schall in der Luft von der Luftfeuchtigkeit ist in Abbildung 2-7 (links) zu sehen. Sie beeinflusst außer der Dämpfung auch die Schallgeschwindigkeit. Bei einer Zunahme der Luftfeuchte erwartet man einerseits auf Grund der Vergrößerung der Relaxationsfrequenz eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit. Andererseits ändert sich mit der Luftfeuchte auch die Zusammensetzung der Luft. Bei gleicher Temperatur und gleichem Druck ist die Dichte von Wasserdampf nur 60% der Dichte von trockener Luft. Daher erwartet man eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit. Die beiden einander entgegenwirkenden Effekte führen dazu, dass die Schallgeschwindigkeit zwischen 0% und 15% relativer Feuchte zunächst ein wenig abnimmt und dann zwischen 15% und 100% monoton um etwa 0,4% zunimmt. Die molekulare Absorption des Sauerstoffs ist der Grund dafür, dass in allen Räumen die Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen kleiner werden. Der Einfluss der Schallabsorption im Raumvolumen lässt sich durch Angabe einer zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche  $8\alpha_L \cdot V$  beschreiben. Die Nachhallgleichung lautet dann<sup>27</sup>:

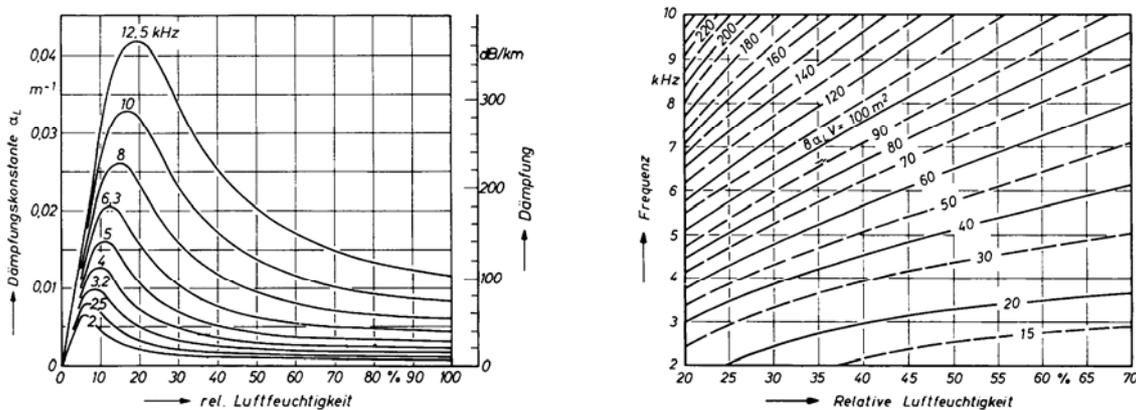
$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha S + 8\alpha_L V}$$

**Formel 2.16:** Nachhallzeit mit Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte

Hier sind  $S$  die Oberfläche,  $V$  das Volumen,  $\alpha$  der Absorptionsgrad des Raumes und  $\alpha_L$  der Absorptionsgrad in Luft. Bei höheren Frequenzen überwiegt die Luftabsorption ( $8\alpha_L \cdot V$ ) die Wandabsorption ( $\alpha S$ ), so dass die Nachhallzeit nicht mehr vom Volumen abhängt. Für ein Raumvolumen von  $V = 1000\text{m}^3$  lässt sich die zusätzliche Absorptionsfläche  $8\alpha_L \cdot V$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Frequenz aus Abbildung 2-7(rechts) able-

<sup>27</sup> vgl. [MEYER]

sen. Bei Frequenzen unter 1kHz liefert neben der Schwingungsrelaxation des Sauerstoffes auch die des Stickstoffes einen Beitrag zur Dämpfung.



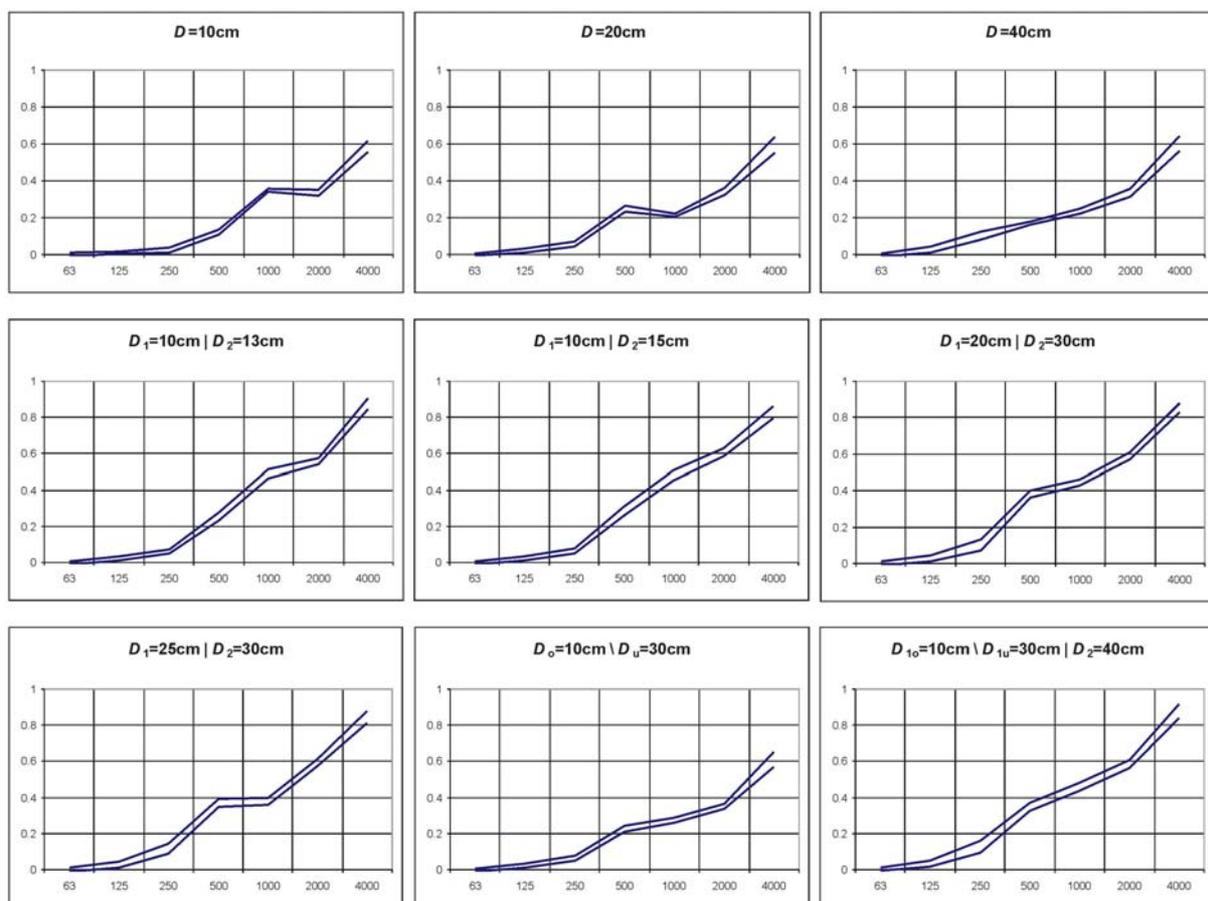
**Abbildung 2-7:** links: Dämpfungskonstante der Luft als Funktion der relativen Luftfeuchte mit der Frequenz als Parameter (Temperatur 20°C); rechts: Durch die Luftabsorption bedingte zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche  $8\alpha_L \cdot V$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Frequenz für ein Raumvolumen von  $V=1000\text{m}^3$

In Abbildung 2-7 ist aber zu sehen, dass hier nur Werte ab einer Frequenz von 2kHz abzulesen sind, was bedeutet, dass ein Einfluss auf die Nachhallzeit bei tieferen Frequenzen kaum feststellbar und somit vernachlässigbar ist. Nimmt man die Nachhallzeit  $T_{30}=5,35\text{s}$  bei 2kHz aus der Sommermessung an Mikrofonposition 1 (mit den klimatischen Bedingungen 23,5°C und 73% relative Luftfeuchtigkeit), liest aus Abbildung 2-7 für diese Frequenz und diesen Wert der Luftfeuchte ein  $\alpha_L$  von  $0,001\text{m}^{-1}$  ab, so berechnet man einen Absorptionskoeffizienten des leeren Raumes mit 2,25%. Für die gleiche Nachhallzeit (5,35s), aber der Wintermessung entsprechende klimatische Bedingungen (also 15°C und 37% Luftfeuchte), erhält man einen Absorptionskoeffizienten von 1,84%. Dieser liegt also 0,41 Prozentpunkte unter dem des Sommers. Die gleiche Variationsrechnung für 4kHz liefert einen Absorptionskoeffizienten von 2,72% im Sommer; und im Winter 1,49% (1,23 Prozentpunkte Unterschied). Was vor allem aber an Abbildung 2-7 deutlich wird, ist die Forderung der Norm, bei einer Luftfeuchtigkeit von mehr als 40% zu messen. Da unter dieser relativen Luftfeuchte die Abhängigkeit des zusätzlichen äquivalenten Absorptionsgrad einer starken frequenzabhängigen Fluktuation unterworfen ist. Eine weitere, aus diesem Grund auch einsichtige Vorschrift der Norm ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Sie zeigt die maximal zulässigen Abweichungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte innerhalb einer Messung. Das Labor für Bauphysik der TU Graz, dem der Hallraum angegliedert ist, hat verschiedene Testmessungen durchgeführt und dabei festgestellt, dass insbesondere die Luftfeuchtigkeit, und hier in den höheren Frequenzen, einen Einfluss auf die Nachhallzeit zeigt, wenn man die Messung im leeren Raum nicht zu den gleichen Bedingungen wie die Objektmessung durchführt.

Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit	Relative Luftfeuchtigkeit bei allen Messungen innerhalb	Temperatur bei allen Messungen innerhalb	Untere Grenze der Temperatur
40 bis 60%	3%	3°C	10°C
oberhalb 60%	5%	5°C	10°C

**Tabelle 2.4:** Vorschriften der Norm ISO 354 zur relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur

Zusammenfassend kann man sagen, dass also sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit zwar mit in die Ergebnisse der Messungen mit eingehen. Eine derartige Abweichung wie sie jedoch in Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4 festzustellen ist, kann damit nicht erklärt werden. Hier spielen so viele Faktoren eine Rolle, dass eine genaue Bestimmung des Fehlers in dieser Zeit nicht möglich war. Leider wurde am Tag der Absorbermessungen nicht der leere Hallraum an allen sechzehn Mikrofonpositionen gemessen. Es gibt aber glücklicherweise Testmessungen an den Mikrofonpositionen 1 und 2, die im leeren Hallraum vorgenommen wurden und die es nun erlauben einen einigermaßen gültigen Absorptionsgrad für die verschiedenen Konfigurationen zu berechnen. Eine Berechnung des Absorptionsgrades aus den Daten der Sommer-Messungen und der Messungen mit Absorber im Winter scheint jedoch wenig sinnvoll, da man hier schon im leeren Hallraum einen sehr hohen Absorptionsgrad bekommen würde. Dennoch ist an diesen Ergebnissen zu sehen (Abbildung 2-8), dass der Absorptionsgrad nur in sehr geringem Ausmaß streut und daher kann davon ausgegangen werden, dass dies auch bei den übrigen, nicht verwertbaren vierzehn Mikrofonpositionen der Fall wäre.



**Abbildung 2-8:** „Falsche“ Ergebnisse der Absorptionsgradmessungen

Abbildung 2-8 zeigt die an und für sich „falschen“ Ergebnisse der Absorptionsgradberechnungen. Hier wurden die Messergebnisse vom November (mit Absorber) und die Messergebnisse vom Juli zur Berechnung herangezogen. Diese Abbildung ist sehr kritisch zu bewerten. Die beiden Kurven in jeder Darstellung stellen maximale bzw. minimale Ergebnisse der sechzehn Mikrofonpositionen dar. Das bedeutet, der Verlauf des Absorptionsgrades jeder Mikrofonposition liegt innerhalb dieses angegebenen Bereiches. Einzig und allein die Breite des Bereiches kann als Ergebnis dieser Berechnungen gewertet werden. Zu diesem Zweck sei noch

mal auf Abbildung 1-9 bis Abbildung 1-11 verwiesen, die belegen, dass die Messergebnisse, die an einem Tag aufgenommen wurden sehr konsistent sind.

Um eine mögliche Korrektur der November-Messungen zu erreichen, sind die Impulsantworten zweier Messungen (gleiche Mikrofonposition usw.) miteinander verglichen worden. Dazu wurden sie kreuzkorreliert. Es hat sich gezeigt, dass man zwischen den Messungen im Juli und im Dezember eine recht hohe Korrelation findet. Aber immer dann, wenn eine Impulsantwort aus der November-Messung stammt und mit einer Juli- oder Dezember-Messung kreuzkorreliert wird, ist nahezu keine Korrelation nachzuweisen. Auf diese Weise ist es also noch nicht möglich eine Korrektur zu finden. Ein zweiter Versuch diesem Problem beizukommen war, die Impulsantworten der November-Messung zu stauchen bzw. zu strecken, um die Reflexionsmuster übereinander zu schieben. Eine Kreuzkorrelation nach diesem Vorgehen hat aber auch gezeigt, dass es nicht möglich ist, einen Faktor oder eine Methode zu finden, die November-Messungen zu korrigieren. Es muss also festgestellt werden, dass die November-Messungen so genannte Ausreißer sind und nicht korrigiert werden können.

## 2.5 Die 1. Messung – einschichtige Aufbauten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen vorgestellt, die aus der ein- und zweilagigen Anordnung der mikroperforierten Folienabsorber hervorgegangen sind, nachdem der Aufbau und die Vorgehensweise der Messung besprochen wurde. Für die einschichtige Anordnung wurden drei verschiedene Konfigurationen gemessen (Abstand 10cm, 20cm und 40cm zur Wand), für die zweischichtige Anordnung, das ‚Sandwich‘-Modell, wurden vier unterschiedliche Messaufbauten realisiert und gemessen (10cm | 13cm, 10cm | 15cm, 20cm | 30cm und schließlich 25cm | 30cm). Zur zweilagigen Konfiguration ist im Vorfeld folgende Überlegung angestellt worden: Es soll einmal der Abstand der wandnahen Folie konstant bleiben, der Abstand der wandfernen Folie wird variiert. Für eine weitere Messung soll umgekehrt, die wandferne Folie immer den gleichen Abstand zu Wand haben. Hier wird der Abstand der wandnahen Folie verändert.

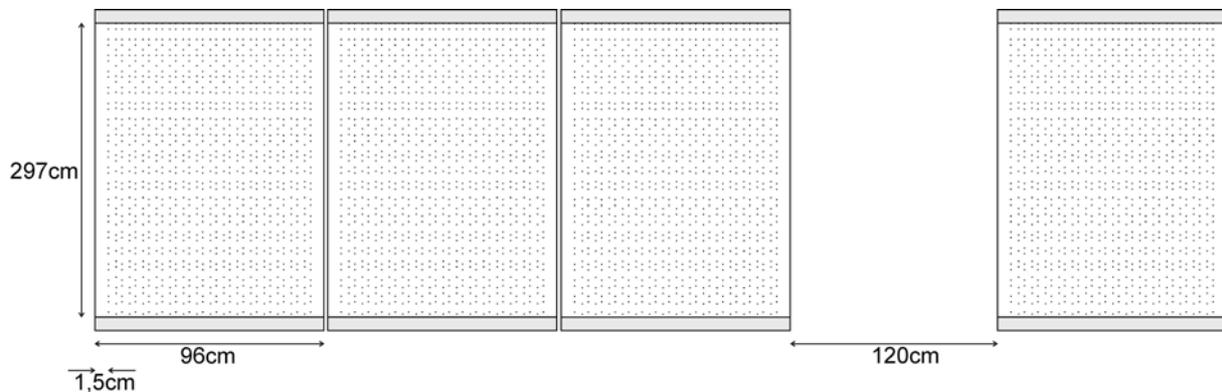
### 2.5.1 Messaufbau und Messkonzept

Grundsätzlich ist für diese Messungen das gleiche Setup verwendet worden wie für die Messung 2 aus dem ersten Teil. Hierzu sei auf Abbildung 1-4, Abbildung 1-5 und Abbildung 1-6 verwiesen. Da die Quellposition  $Q_1$  in den ersten Messungen gute Durchschnittswerte lieferte, ist diese Position auch für alle folgenden Messungen zum Einsatz gekommen (vgl. Tabelle 1.5). Die 16 Mikrofone standen an den gleichen Punkten, in der gleichen Höhe, wobei darauf geachtet wurde, jedes einzelne Mikrofon (nach der Inventar-Nummer) auf der gleichen Messposition zu platzieren. Für diese Messungen stand eine neuere Version von WinMLS2004 zur Verfügung, was einerseits den Vorteil hatte, dass das Programm auf Grund besseren Speichermanagements stabiler lief, andererseits den großen Nachteil hat, dass nur zwei Kanäle gleichzeitig gemessen werden konnten – bei Messung 1 waren es acht Kanäle – was sich natürlich ungünstig auf die Dauer der gesamten Messung auswirkte.

Im Prinzip entspricht die Montage der Folien im Hallraum der Montageart Typ G der Norm EN20354/A1<sup>28</sup>. Die mikroperforierten Folien konnten nicht in einer zusammenhängenden Fläche aufgehängt werden, da die Montagevorrichtungen für die Diffusoren im Weg waren. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Fläche in zwei Teilflächen aufzuteilen.

Die Folie, welche zur Messung zur Verfügung stand hat folgende Eigenschaften:

- Material: Polycarbonat-Folie
- Foliendicke: 0,1mm
- Perforation: Lochdurchmesser: ca. 0,2mm  
Lochabstand: 2mm  
Perforationsgrad: ca. 0,79%



**Abbildung 2-9:** Aufhängung der mikroperforierten Folien im Hallraum – Aufteilung in 2 Teilflächen

Aus den in Abbildung 2-9 gekennzeichneten Maßen ergeben sich folgende Werte für die Flächen des Prüflings, gerechnet wird nur der tatsächlich mikroperforierte Teil:  $0,93\text{m} \cdot 2,97\text{m} \cdot 3 = 8,2863\text{m}^2$  für die linke, große Teilfläche und  $0,93\text{m} \cdot 2,97\text{m} = 2,7621\text{m}^2$  für den rechten kleineren Teil. In Summe sind das  $11,0484\text{m}^2$ , was zumindest flächenmäßig die Anforderungen der Norm erfüllt.

<sup>28</sup> vgl. [NORM 2]



**Abbildung 2-10:** Links: die rechte große Teilfläche; Mitte: beide Teilflächen und der „störende“ Diffusor; rechts: die rechte, kleinere Teilfläche

Abbildung 2-10 zeigt auch die Art und Weise der Aufhängung der Folienabsorber im Hallraum, die Folien selbst sind zwischen zwei Holzleisten eingespannt, die in einer Schiene liegen und leicht verschiebbar sind. An jeder Schiene sind Vorrichtungen zum Arretieren der Holzleisten vorgesehen. Diese Schienen sind auch am unteren Ende der Folien vorgesehen um diese einspannen zu können, was allerdings durch die nicht vorgesehene Improvisation der Aufteilung in zwei Teilflächen nur begrenzt möglich war, weil die für unten vorgesehenen Montagehalterungen am oberen Ende gebraucht wurden. Die Folien waren also eher gehängt als gespannt. Trotzdem wird natürlich eine gewisse Spannung durch das Gewicht der unteren Holzleisten erreicht.

Man kann davon ausgehen, dass alle Anordnungen in gewisser Weise auch als Absorber nach dem  $\lambda/4$ -Prinzip funktionieren. Befindet sich die Folie im Abstand  $\lambda/4$  vor der Wand, wo sich ein Maximum der Schallschnelle befindet, so ist dort die größte Bewegung der Luftteilchen, diese reiben nun in der Mikroperforation und die Schallenergie wird in Wärmeenergie verwandelt. Bei der entsprechenden Frequenz ist also ein Absorptionsmaximum zu erwarten. Umgekehrt funktioniert dieses Prinzip genauso bei  $\lambda/2$ , wo sich ein Druckmaximum und entsprechend ein Schnelleminimum befindet. Die Luftteilchen bewegen sich hier nicht, es findet also auch keine Reibung statt, insofern ist bei der entsprechenden Frequenz ein Absorptionsminimum zu erwarten. Für alle in den nachfolgenden Messungen vorkommenden Wandabstände, aber auch für die Abstände zwischen zwei Folien (für die zweischichtigen Anordnungen) sind die Frequenzwerte an denen ein Absorptionsminimum bzw. –maximum zu erwarten ist, in Tabelle 2.5 angeführt. Diese Tabelle wird auch in den einzelnen Kapiteln Anordnung A bis Anordnung G nochmals angeführt, wobei die relevanten Wand- bzw. Folienabstände markiert sind.

Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\min}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\max}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

**Tabelle 2.5:** Frequenzen an denen Absorptionsminima bzw. –maxima erwartet werden, wenn von einer  $\lambda/4$ -Absorption ausgegangen wird, in Abhängigkeit vom Abstand zur Wand bzw. vom Abstand von Folie zu Folie

## 2.5.2 Anordnung A (10cm)

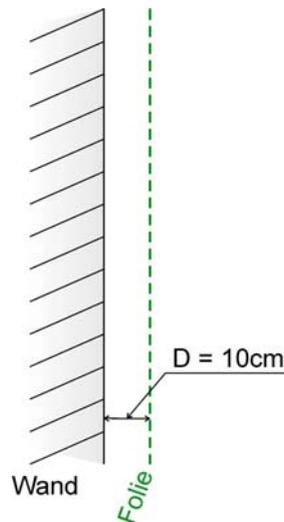


Abbildung 2-11: Aufbau A, einschichtig mit Abstand  $D=10\text{cm}$  zur Wand

Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Schon beim ersten Blick auf die Nachhallzeiten (vgl. Abbildung 2-12) des leeren Raumes und der Absorbermessung ist kein großer Unterschied dieser beiden Kurven zu erkennen. Es ist also mit einem recht geringen Absorptionskoeffizienten zu rechnen, was sich in Abbildung 2-13 bestätigt, was bei einer solchen Anordnung mit recht geringer Einbautiefe ( $D=10\text{cm}$ ) nicht weiter verwundert. Findet man in der Literatur deutlich höhere Werte für den Absorptionsgrad, so ist zu berücksichtigen, dass dort die Folien wesentlich mehr unter Spannung gemessen wurden und zudem noch die Seiten zwischen Folie und Wand abgeschlossen waren, d.h. der Luftraum hinter den Folien deutlich mehr zur Absorption beiträgt.

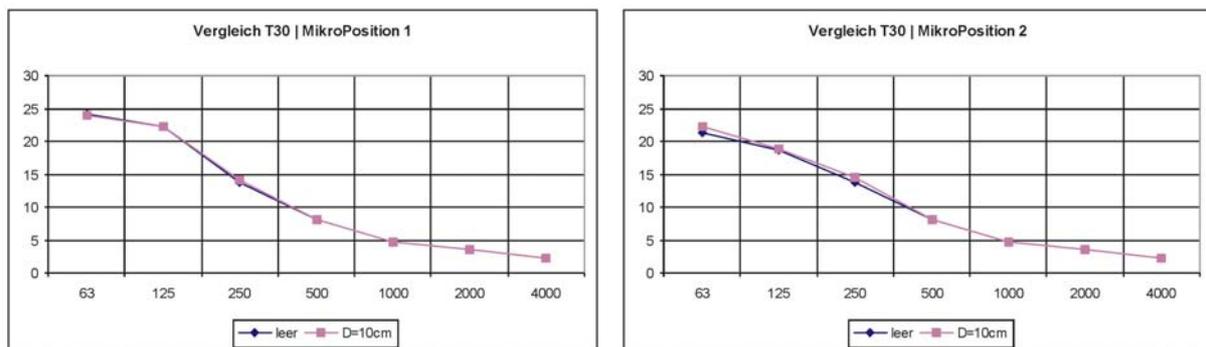


Abbildung 2-12: Vergleich der Nachhallzeiten  $T_{30}$  des leeren Raumes und der Absorbermessung (hier  $D=10\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Im rechten Teil der Abbildung 2-13 kann abgelesen werden, dass Mikrofonposition 2 bei tiefen Frequenzen zu niedrigeren Ergebnissen tendiert, bei 4kHz aber etwas mehr Absorption als bei Mikrofonposition 1 erreicht. Die Zahlenwerte der Messung (zu finden im Anhang auf der CD) mit Absorber liegen sogar über den Nachhallzeiten der Nullmessung, also im leeren Hallraum. Von einer absorbierenden Wirkung kann hier also gerade zu tiefen Frequenzen hin

nicht gesprochen werden, liegen die Werte hier bei unter 2% Absorption, bei 4kHz zwischen 4% und 6% für die beiden Mikrofonpositionen. Auch ein frequenzselektives Verhalten dieser Anordnung kann schwer ausgemacht werden, nur eine Zunahme der Absorption ab 250Hz ist zu erwähnen.

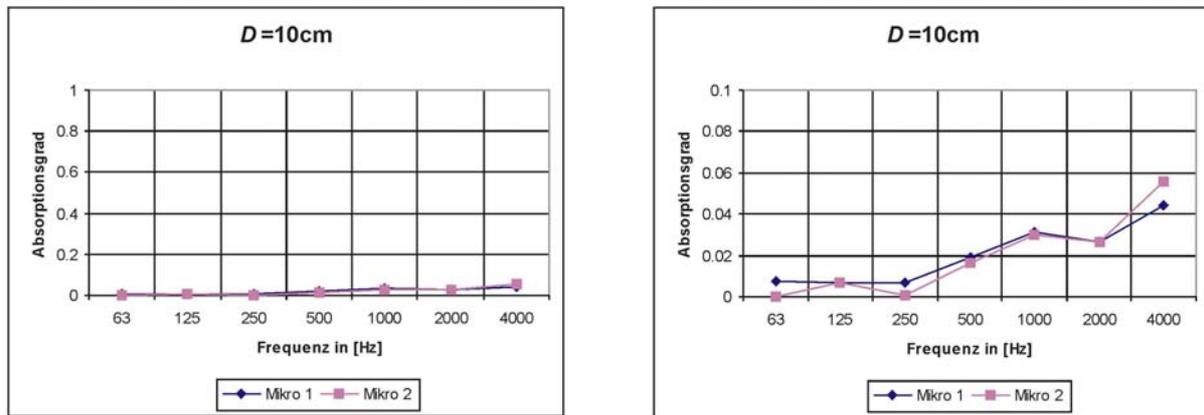


Abbildung 2-13: Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 10cm (rechte Abbildung mit genaueren Skalierung)

### 2.5.3 Anordnung B (20cm)

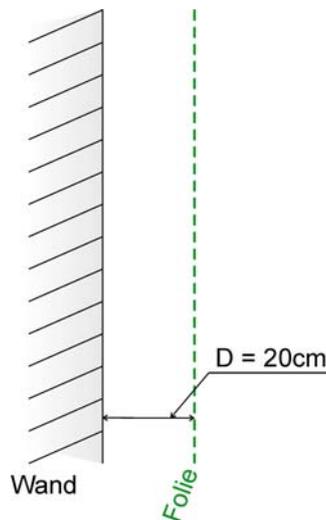
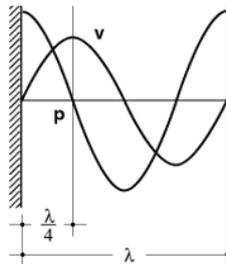


Abbildung 2-14: Aufbau B, einschichtig mit Abstand  $D=20\text{cm}$  zur Wand

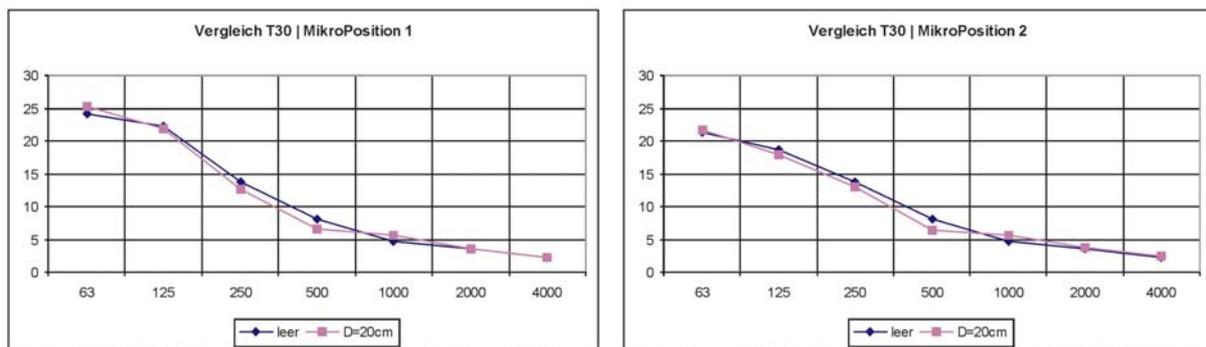
Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Der Vergleich der Nachhallzeiten in Abbildung 2-16 mit und ohne Absorber des Hallraums lässt nun bei dieser Anordnung schon mit höheren Absorptionsgraden rechnen. Interessant ist, dass bei dieser Messung beide Mikrofonpositionen der Messung mit Absorber bei 1kHz einen T30-Wert liefern, der über dem Wert der Nullmessung liegt. Dafür ist bei 500Hz von vorne herein eine größere Differenz der beiden Werte zu erkennen. Da diese beiden Extremwerte genau eine Oktave auseinander liegen, ist eine Betrachtung der Wellenlänge  $\lambda$  bei dieser Anordnung sinnvoll. Betrachtet man den Abstand der Folie zur Wand, der hier  $D=20\text{cm}$  beträgt

und geht man davon aus, dass dies auch nach dem Prinzip eines  $\lambda/4$ -Absorbers funktioniert, so liegt die Absorptionsfrequenz bei 425Hz (mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c=340\text{ms}^{-1}$  und bei  $15^\circ\text{C}$  Raumtemperatur, vgl. Formel 1.2), die halbe Wellenlänge liegt bei 950Hz. Dies ist eine recht gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Ergebnis. Das Funktionsprinzip eines  $\lambda/4$ -Absorbers lässt sich sehr leicht erklären, wirft man einen Blick auf die Schallschnelle. Diese hat an der Wand ein (Betrags-)Minimum, bei  $\lambda/4$  ein Maximum und bei  $\lambda/2$  natürlich wieder ein Minimum. Das heißt, dort wo die schwingenden Luftteilchen ihre größte Auslenkung haben, erfahren sie die meiste Reibung, wenn sich dort das absorbierende Material befindet.

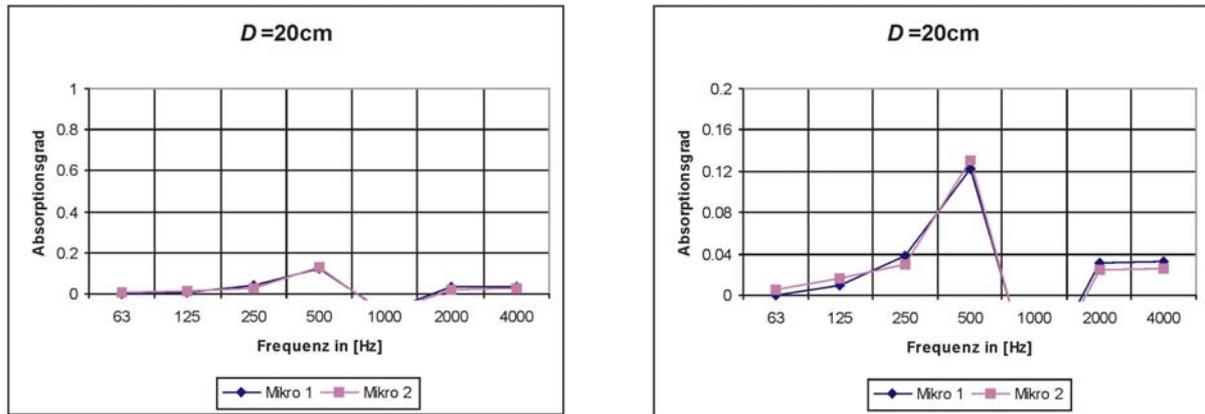


**Abbildung 2-15:** Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $v$  vor einer schallharten Wand (zum Prinzip des  $\lambda/4$ -Absorbers)



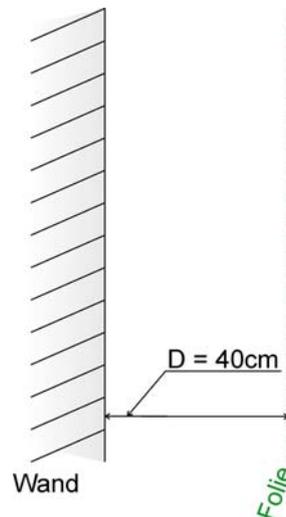
**Abbildung 2-16:** Vergleich der Nachhallzeiten  $T_{30}$  des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D=20\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Am Absorptionsgrad in Abbildung 2-17 ist oben genannte Wirkung als  $\lambda/4$ -Absorber noch deutlicher zu erkennen. Beim Maximum der Schallschnelle ( $\lambda/4$ ) findet die größte Absorption statt, bis etwa 13%, beim Minimum der Schallschnelle, also dort wo die Luftteilchen kaum bzw. gar nicht ausgelenkt werden, findet keine Absorption statt, hier könnte man schon eher von Resonanz sprechen, da die Nachhallzeit mit Absorber über der Nachhallzeit der Nullmessung liegt, also ein negativer Absorptionsgrad berechnet wird.



**Abbildung 2-17:** Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 20cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung)

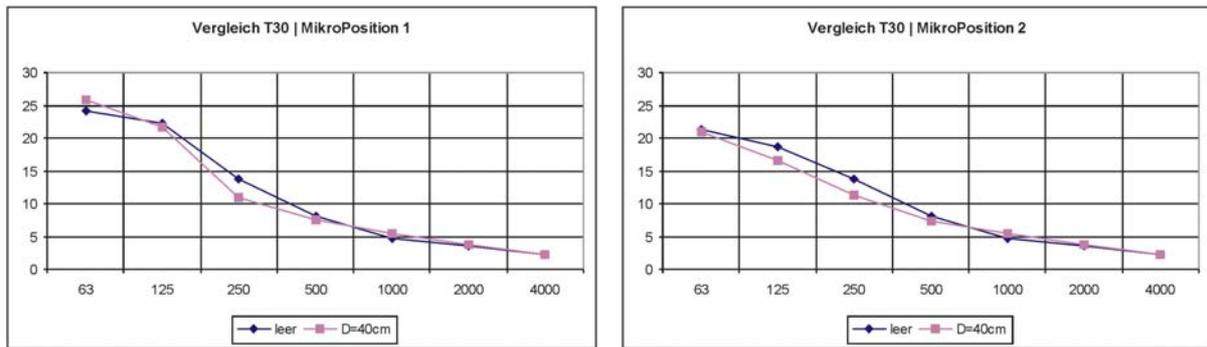
## 2.5.4 Anordnung C (40cm)



**Abbildung 2-18:** Aufbau C, einschichtig mit Abstand  $D=40\text{cm}$  zur Wand

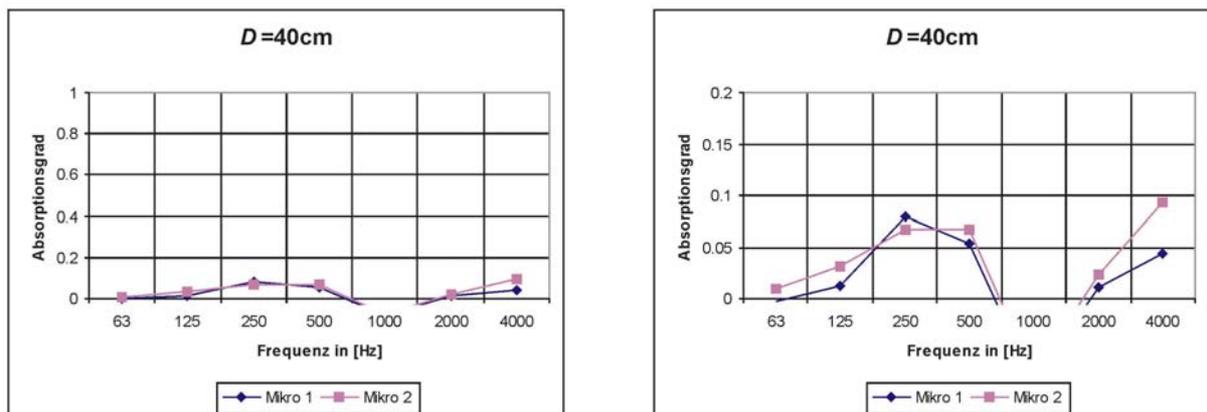
Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Wie zu erwarten ist, steigt natürlich der Unterschied zwischen Absorber- und Nullmessung mit dem Wandabstand des Absorbers. Wieder ist bei 1kHz ein ähnliches Phänomen wie vorher, beim Abstand  $D=20\text{cm}$ , zu erkennen.



**Abbildung 2-19:** Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D=40\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Der Absorptionsgrad (vgl. Abbildung 2-20) für diese Anordnung ( $D=40\text{cm}$ ) zeigt ein lokales Maximum zwischen 250Hz und 500Hz, in diesem Bereich ist die Absorption bei etwa 8%, im weiteren Verlauf sinkt sie auf 0 ab und steigt später wieder an. Während Mikrofonposition 1 hier bis zu einem Wert von 10% steigt, geht der Absorptionsgrad an Mikrofonposition 2 bei 4kHz lediglich auf ca. 5%. Die Wirkungsweise eines  $\lambda/4$ -Absorbers ist hier nicht zu erkennen. Da das Minimum weiterhin bei ca. 1kHz liegt, und nicht wie theoretisch ermittelt bei 431Hz. Das Maximum bei 250Hz ist allerdings vorhanden.



**Abbildung 2-20:** Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 40cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung)

## 2.6 Die 2. Messung: Mehrschichtige Aufbauten – Das ‚Sandwich‘-Modell

### 2.6.1 Anordnung D (10cm | 13cm)

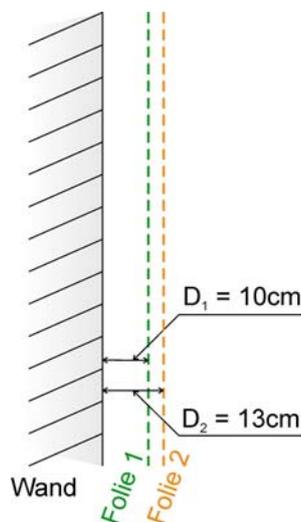


Abbildung 2-21: Aufbau D, zweischichtig mit den Abständen  $D_1=10\text{cm}$  und  $D_2=13\text{cm}$  zur Wand

Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Bei dieser Anordnung der Absorberfolien in zwei Lagen mit den Abständen  $D_1=10\text{cm}$  und  $D_2=13\text{cm}$  ist nun an den Nachhallzeiten eine etwas breitbandigere Wirkung der Absorber zu erkennen. Die T30-Kurven der Messung mit Absorber liegt durchwegs unter denen der Nullmessung, mit Ausnahme des Frequenzbandes mit der Mittenfrequenz 63Hz bei Mikrofonposition 1. Dies überrascht allerdings nicht weiter, da ja die Streuung der Nachhallzeit in diesem Frequenzband recht hoch ist und zudem einer größeren Messungenauigkeit unterworfen ist, wie im ersten Teil dieser Arbeit schon gezeigt wurde (vgl. Abbildung 1-51).

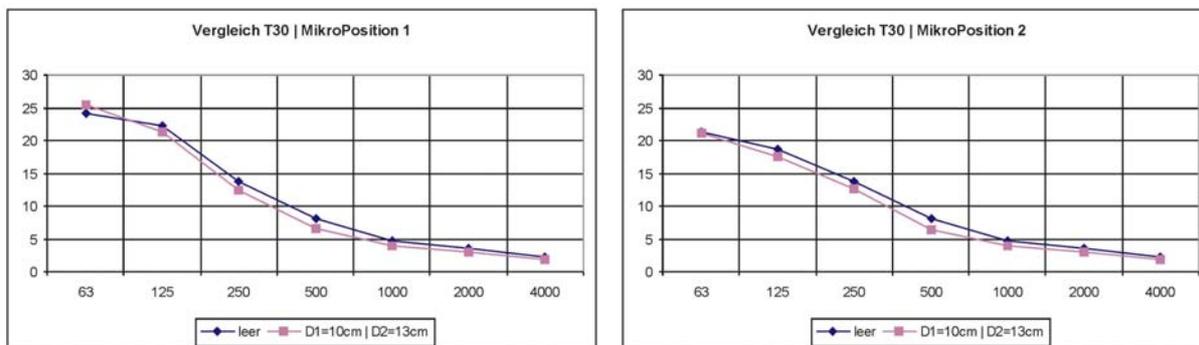
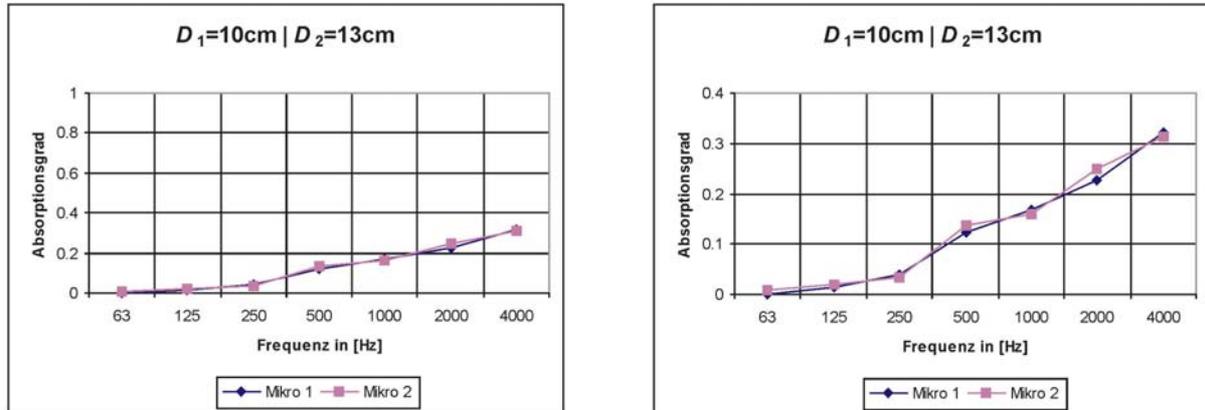


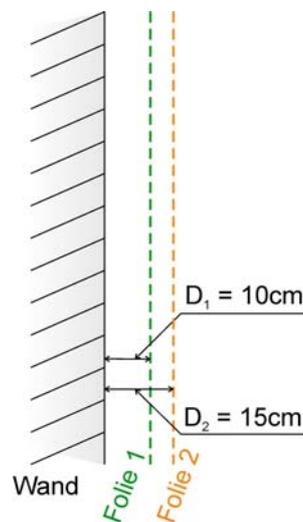
Abbildung 2-22: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D_1=10\text{cm}$  und  $D_2=13\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Zum Verlauf des Absorptionsgrades in Abbildung 2-23 ist zu sagen, dass der Einbruch bei 1kHz eigentlich nur noch an Mikrofonposition 2 leicht zu erkennen ist. Ansonsten nimmt die Absorption von wenigen Prozent bei 63Hz mit steigender Frequenz bis zu über 30% bei 4kHz stetig zu, obwohl hier weniger als die Hälfte der Einbautiefe in der letzten Konfiguration (vgl. Kapitel 2.5.4) notwendig ist.



**Abbildung 2-23:** Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 10cm und 13cm (rechte Abbildung mit genauere Skalierung)

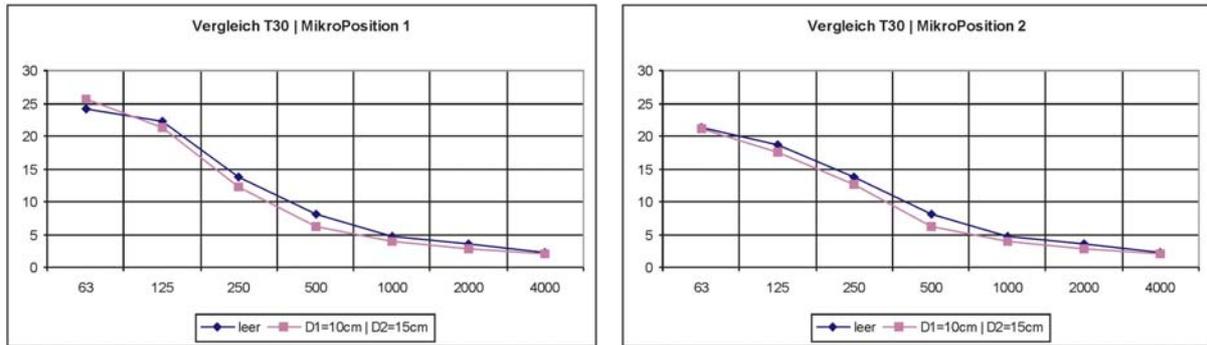
## 2.6.2 Anordnung E (10cm | 15cm)



**Abbildung 2-24:** Aufbau E, zweischichtig mit den Abständen  $D_1=10\text{cm}$  und  $D_2=15\text{cm}$  zur Wand

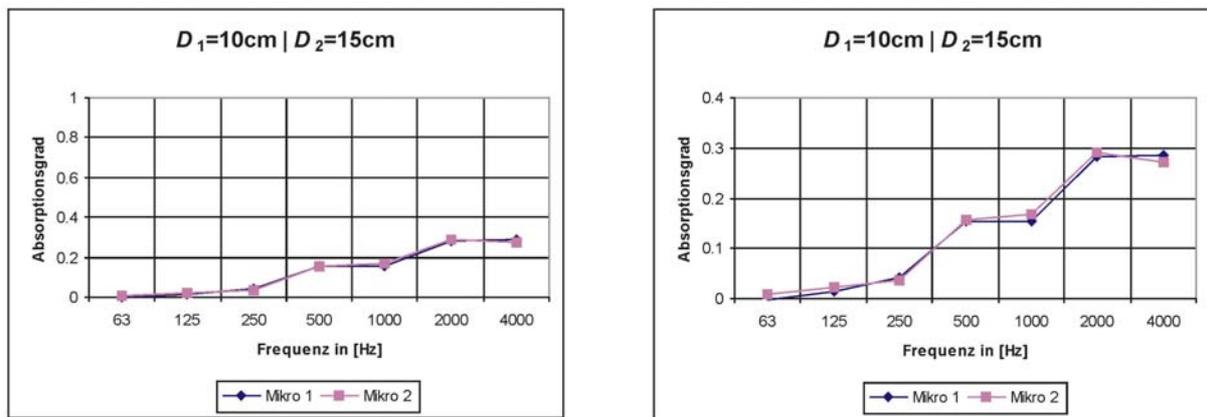
Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Abbildung 2-25 zeigt trotz größerer Einbautiefe vergleichsweise nur eine geringe Erhöhung der Absorption. Dies spricht für eine ungünstige Wahl der beiden Wandabstände  $D_1$  und  $D_2$ , da der Abstand der Folien zueinander im kleinen, ganzzahligen Verhältnis steht:  $D_2-D_1=D_1/2$ .



**Abbildung 2-25:** Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D_1=10\text{cm}$  und  $D_2=15\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Im den Graphen des Absorptionsgrades in Abbildung 2-26 ist ein Sattelpunkt zwischen 500Hz und 1kHz zu erkennen. Auch hier bleibt das Maximum des Absorptionsgrades knapp unter 30% bei 4kHz.



**Abbildung 2-26:** Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 10cm und 15cm (rechte Abbildung mit genauere Skalierung)

### 2.6.3 Anordnung F (20cm | 30cm)

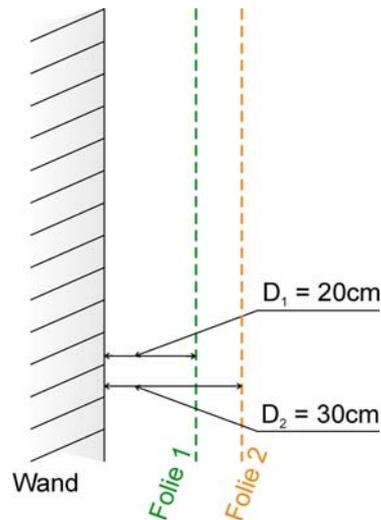


Abbildung 2-27: Aufbau F, zweischichtig mit den Abständen  $D_1=20\text{cm}$  und  $D_2=30\text{cm}$  zur Wand

Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{\alpha=\min}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{\alpha=\max}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

Diese Anordnung ist im Grunde genommen eine Kombination der Anordnung mit  $D=20\text{cm}$  und der Anordnung mit  $D=10\text{cm}$  (vgl. Abbildung 2-11 und Abbildung 2-14) und es ist auch gewissermaßen eine Überlagerung der beiden Absorptionsgradkurven zu erkennen. So gesehen würde man aber erwarten, dass die Folie, die 10cm Abstand von der wandnäheren Folie hat, fast keinen Beitrag zur Absorption liefert. Das ist aber nicht der Fall. Viel eher lässt sich behaupten, dass die Folie mit 20cm Wandabstand die grobe Struktur des Verlaufes des Absorptionsgrades bestimmt, also zum Beispiel den Einbruch bei 1kHz. Die Folie mit 10cm Abstand zur wandnäheren Folie, bzw. mit 30cm Abstand zur Wand, den Absorptionsgrad insgesamt anhebt.

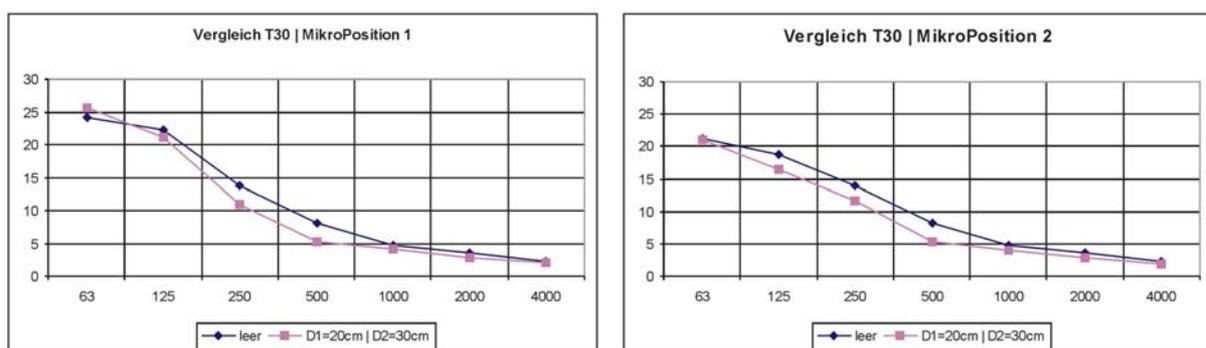


Abbildung 2-28: Vergleich der Nachhallzeiten  $T_{30}$  des leeren Raums und der Absorberrmessung (hier  $D_1=20\text{cm}$  und  $D_2=30\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2

Das Zurückgehen des Absorptionsgrades bei 1kHz ist sicherlich mit der gleichen Begründung (Prinzip des  $\lambda/4$ -Absorbers) zu begründen, wenngleich in diesem Fall der Einbruch bei weitem nicht so stark ausgeprägt ist wie in der einschichtigen Anordnung mit einem Abstand von 20cm Folie - Wand. Dieser starke Einbruch wird durch die zweite Folie verhindert.

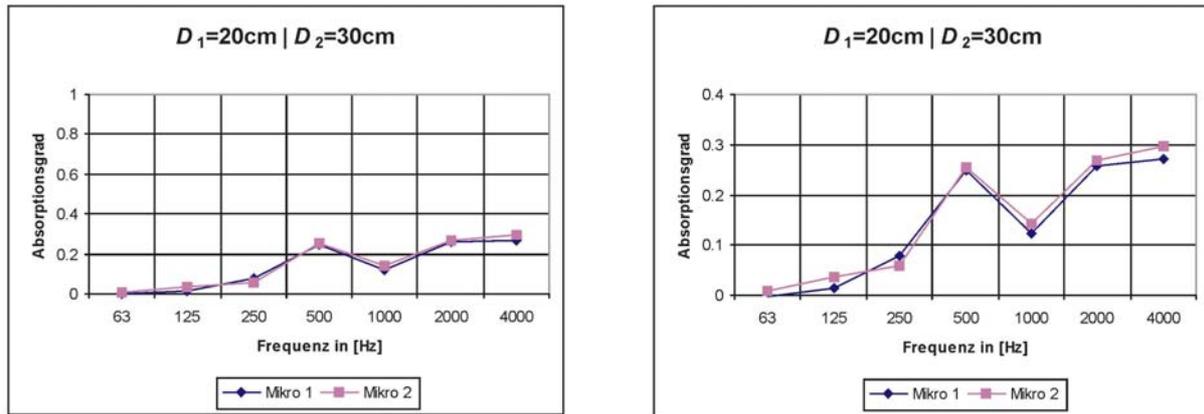


Abbildung 2-29: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 20cm und 30cm (rechte Abbildung mit genauere Skalierung)

### 2.6.4 Anordnung G (25cm | 30cm)

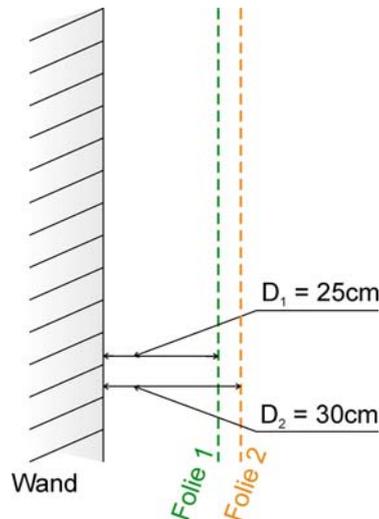
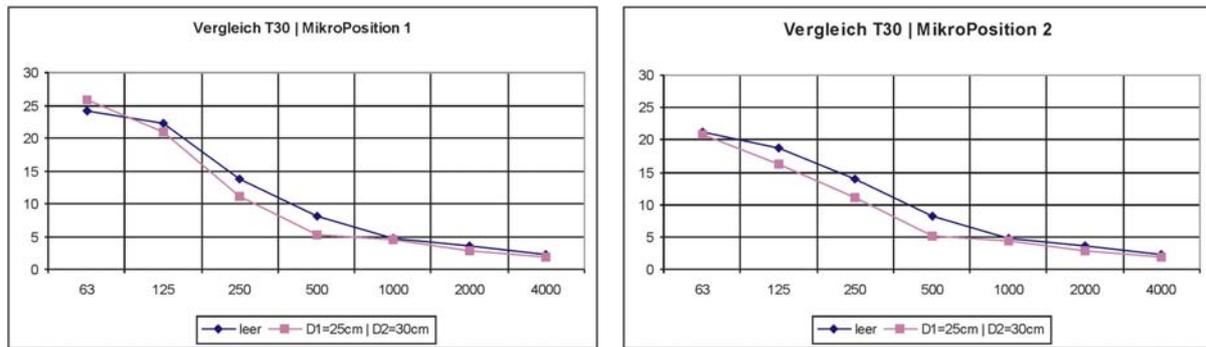


Abbildung 2-30: Aufbau G, zweischichtig mit den Abständen  $D_1=25\text{cm}$  und  $D_2=30\text{cm}$  zur Wand

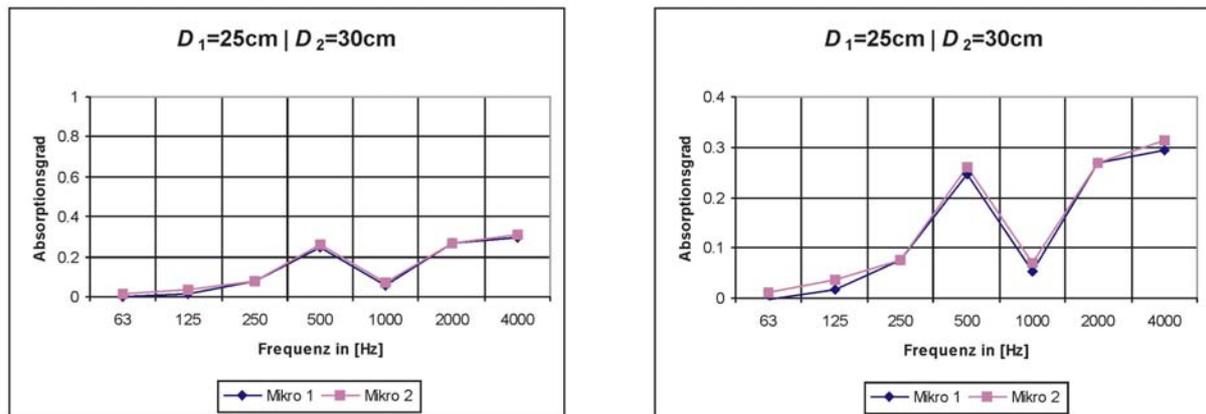
Abstand in [cm]	3	5	10	13	15	20	25	30	40
$f_{a=\text{min}}$ in [Hz]	5751.7	3451.0	1725.5	1327.3	1150.3	862.8	690.2	575.2	431.4
$f_{a=\text{max}}$ in [Hz]	2875.8	1725.5	862.8	663.7	575.2	431.4	345.1	287.6	215.7

In den Frequenzbändern mit einer Mittenfrequenz von 125Hz, 250Hz und 500Hz kann man die höhere Absorption dieser Anordnung schon bei einem Blick auf die Nachhallzeiten erkennen. Bei 1kHz fallen aber die Nachhallzeit der Absorbermessung und die der Nullmessung wieder sehr nahe zusammen.



**Abbildung 2-31:** Vergleich der Nachhallzeiten des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D_1=25\text{cm}$  und  $D_2=30\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2

Es ist offensichtlich in Abbildung 2-32, dass hier der Knick bei 1kHz im Verlauf des Absorptionsgrades wieder etwas stärker ist als in der Anordnung mit  $D_1=20\text{cm}$  und  $D_2=30\text{cm}$  (hier liegt das lokale Minimum noch bei über 10% Absorption), was darauf zurückzuführen ist, dass der Abstand 5cm von Folie zu Folie einen nicht so großen Beitrag zur Absorption liefert. Das lokale Minimum liegt hier wieder etwas tiefer bei nicht ganz 10% Absorption.



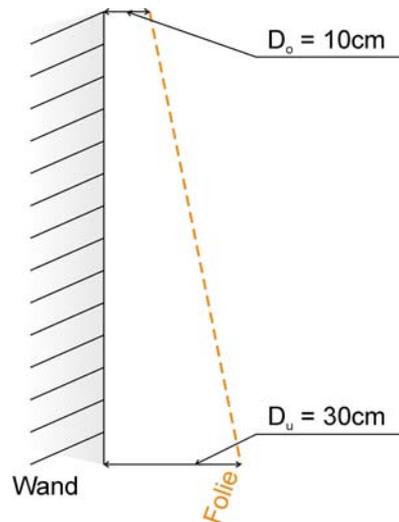
**Abbildung 2-32:** Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 25cm und 30cm (rechte Abbildung mit genauere Skalierung)

## 2.7 Die 3. Messung – Aufbauten mit nicht-konstantem Wandabstand

Hier werden die Ergebnisse des weniger konventionellen Aufbaus – die Folien hängen nicht parallel zur Wand, sondern haben einen nicht-konstanten Abstand zur Wand – besprochen. Dieser Aufbau eignet sich vor allem dann, wenn z.B. aus baulichen Gründen die Einbautiefe der Folien oben und unten nicht im gleichen Abstand geschehen kann. Zunächst wurde eine Konfiguration gemessen, bei der die Folien oben einen Abstand von 10cm zur Wand hatten und unten einen Abstand von 30cm (10cm \ 30cm), danach eine zweilagige Konfiguration, bei der die wandnahe Folie oben auch 10cm von der Wand entfernt war, unten wieder 30cm. Die zweite Folie war im Abstand 40cm parallel zur Wand aufgehängt (10cm \ 30cm | 40cm).

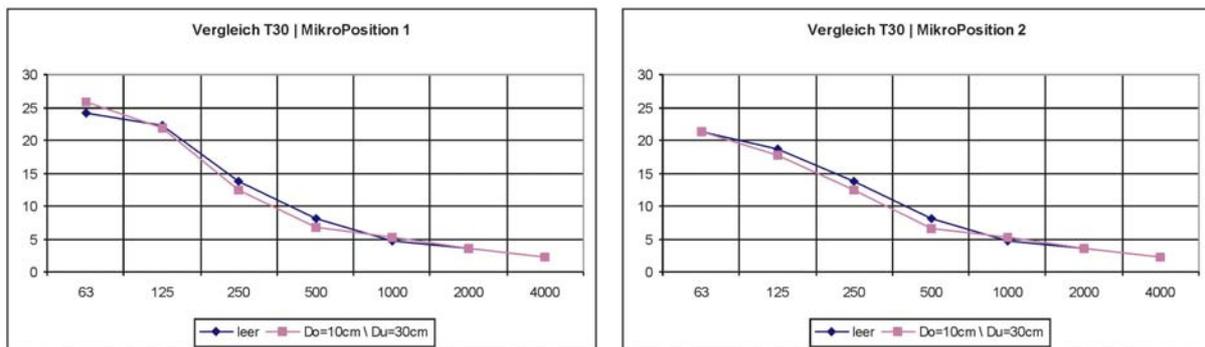
Messaufbau und Messkonzept entsprechen genau dem der vorangegangenen Messungen.

## 2.7.1 Aufbau H (10cm \ 30cm)



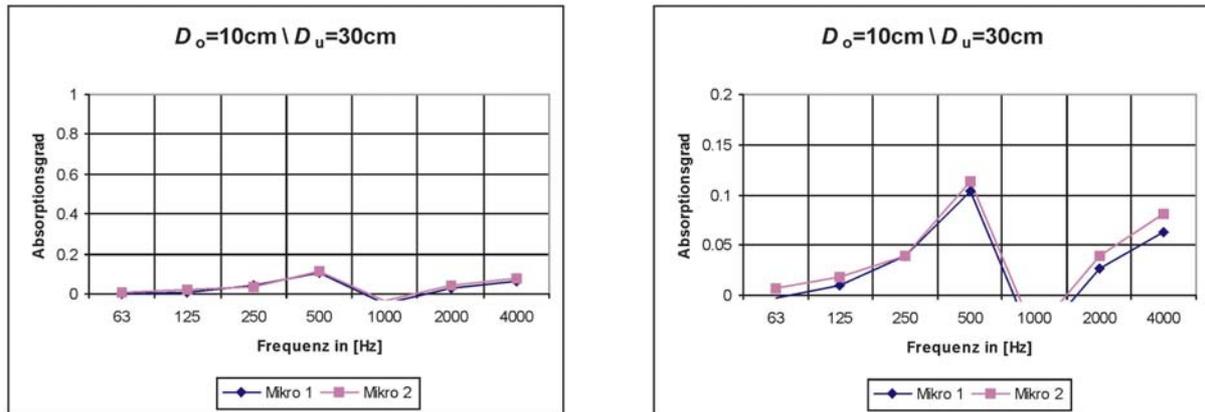
**Abbildung 2-33:** Aufbau H, einseitig mit den Abständen  $D_o=10\text{cm}$  und  $D_u=30\text{cm}$  zur Wand

Am Vergleich der Nachhallzeiten mit und ohne Absorber in Abbildung 2-34 ist auch hier wieder zu erkennen, dass es der Absorptionsgrad bei 1kHz geringer ausfallen wird.



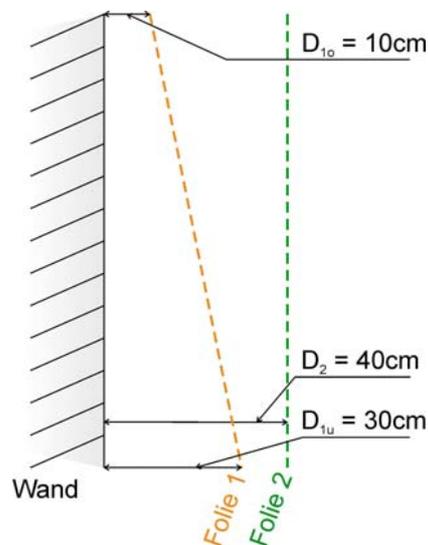
**Abbildung 2-34:** Vergleich der Nachhallzeiten  $T_{30}$  des leeren Raums und der Absorbermessung (hier  $D_o=10\text{cm}$  und  $D_u=30\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2

Der Knick des Absorptionsgrades bei 1kHz, der von knapp über 10% Absorption auf 0 absinkt, kann auch hier wieder mit Hilfe des  $\lambda/4$ -Absorber-Prinzips erklärt werden, wenn man bei dieser Anordnung einen mittleren Abstand der Folie zur Wand von 20cm annimmt.



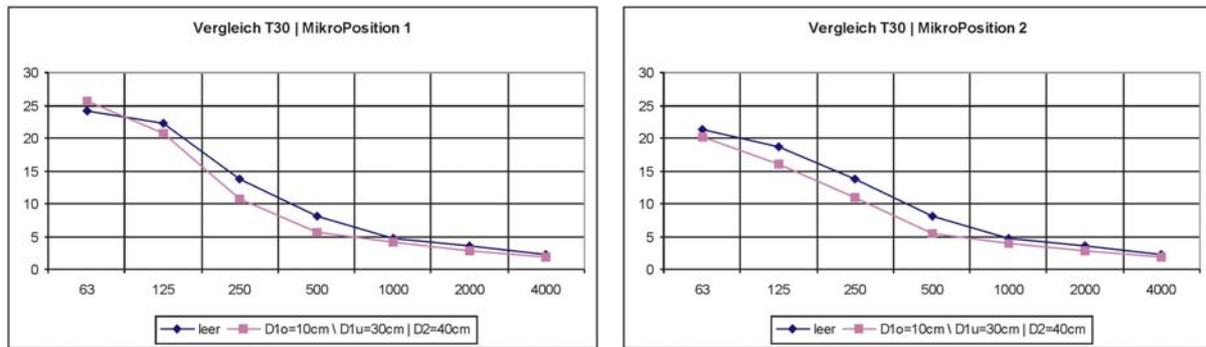
**Abbildung 2-35:** Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung mit nicht-konstantem Wandabstand (oben 10cm, unten 30cm – rechte Abbildung mit genauerer Skalierung)

## 2.7.2 Aufbau I (10cm \ 30cm | 40cm)



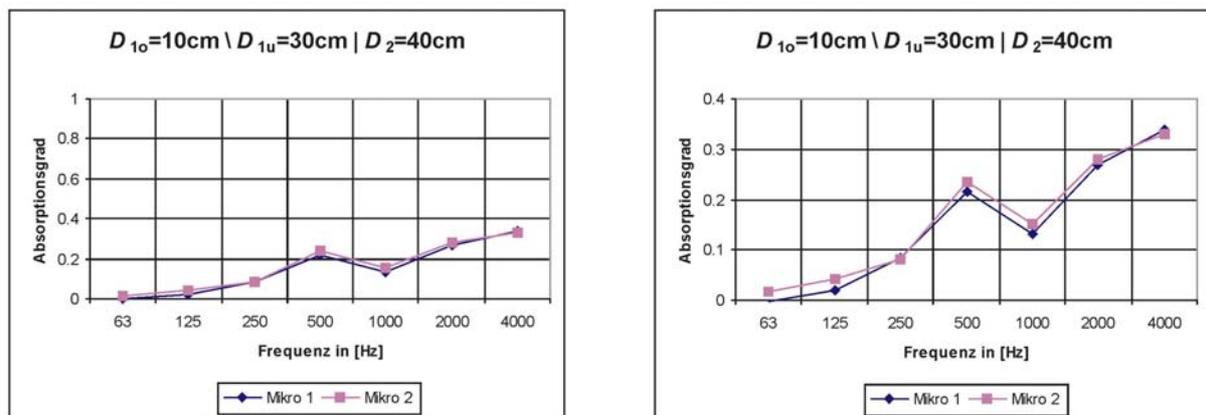
**Abbildung 2-36:** Aufbau I, zweischichtig mit den Abständen  $D_{1o}=10\text{cm}$ ,  $D_{1u}=30\text{cm}$  und  $D_2=40\text{cm}$  zur Wand

Mit dieser Anordnung wird zweifellos der im Mittel höchste Absorptionsgrad erreicht, was schon am Abstand der Nachhallkurven in Abbildung 2-37 zu sehen ist. Der Preis dafür ist allerdings eine relativ große Einbautiefe von 40cm. Auch bei der sonst kritischen Frequenz von 1kHz liegt das T30-Ergebnis der Nullmessung doch höher als der Wert der Absorbermessung. Der einigermaßen parallele Verlauf dieser Kurven zwischen etwa 100Hz und 800Hz lässt auch schon Rückschlüsse auf die Bandbreite der Wirksamkeit dieser Konfiguration ziehen, was vor allem an Mikrofonposition 2 zu sehen ist.



**Abbildung 2-37:** Vergleich der Nachhallzeiten  $T_{30}$  des leeren Raumes und der Absorbermessung (hier  $D_{1o}=10\text{cm}$ ,  $D_{1u}=30\text{cm}$  und  $D_2=40\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2

Auch im tieffrequenten Bereich steigt die Absorption jetzt schneller an, als in den anderen Anordnungen und der starke Rückgang der Kurve bei 1kHz ist in dieser zweilagigen Konfiguration wesentlich weniger ausgeprägt. Bei einer Frequenz von 500Hz wird hier ein Absorptionsgrad von über 20% erreicht, und bei 4kHz liegt er über 30%.



**Abbildung 2-38:** Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung, wobei die wandnahe Folie nicht-konstanten Abstand zur Wand hat (oben 10cm, unten 30cm); die zweite Folie ist parallel zur Wand im Abstand 40cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung)

Grundsätzlich lassen sich folgende Rückschlüsse über die vorangegangenen Messergebnisse schließen: Sehr häufig ist in den Absorptionsgradkurven ein Einbruch bei 1kHz zu beobachten. Für die einlagige Anordnung mit einem Folien-Wand-Abstand von  $D=20\text{cm}$  ist dies mit dem Prinzip des  $\lambda/4$ -Absorbers leicht zu erklären. Da dieses Phänomen allerdings auch bei anderen Konfigurationen auftritt, kann man die Vermutung anstellen, dass es sich nicht nur um den Einfluss der Wellenlänge, bzw. des Minimums der Schallschnelle an dieser Stelle handelt. Denkbar ist bei dieser Art der Folienmontage, dass diese zu einer Schwingung bei etwa 1000Hz angeregt werden, die sich sehr ungünstig auf das Absorptionsverhalten auswirkt, da wahrscheinlich die aufgenommene Energie nicht in Wärmeenergie umgewandelt, sondern nachhaltig abgegeben wird und somit die Absorption negativ beeinflusst. Dies könnte durch eine straffere Spannung bei der Montage der Folien behoben werden.

Es ist klar, dass man mit dieser Art der Montage, also mit nicht zu großer Spannung der Folien und vor allem auch ohne den Raum hinter den Folien zu nutzen, niemals den gleichen Absorptionsgrad erreichen kann, den man in der Literatur findet. Dort gilt es schließlich auch ein Produkt anzupreisen und zu verkaufen, was nicht heißen soll, dass unseriöse Methoden

Anwendung finden, dennoch ist es möglich, auch unter Einhaltung der Norm-Vorschriften die Ergebnisse in gewissen Grenzen zu trimmen. Nachdem aber solche Bedingungen nur im Hallraum bei der Messung, nicht aber in der praktischen Anwendung herrschen, sind diese Ergebnisse mit Absorptionsgraden von bis zu ca. 90% eher kritisch zu bewerten.

## 2.8 Beispiele: Anwendungen in der Praxis

Um diese Arbeit mit einem praxisbezogenen Blick auf tatsächliche Anwendungen noch abzurunden, werden in den folgenden drei Unterkapiteln verschiedene Situationen kurz vorgestellt, in denen mikroperforierte Folien oder andere Flächengebilde (mikroperforierte Platten) zur Verbesserung der Akustik zum Einsatz kommen.

### 2.8.1 Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh

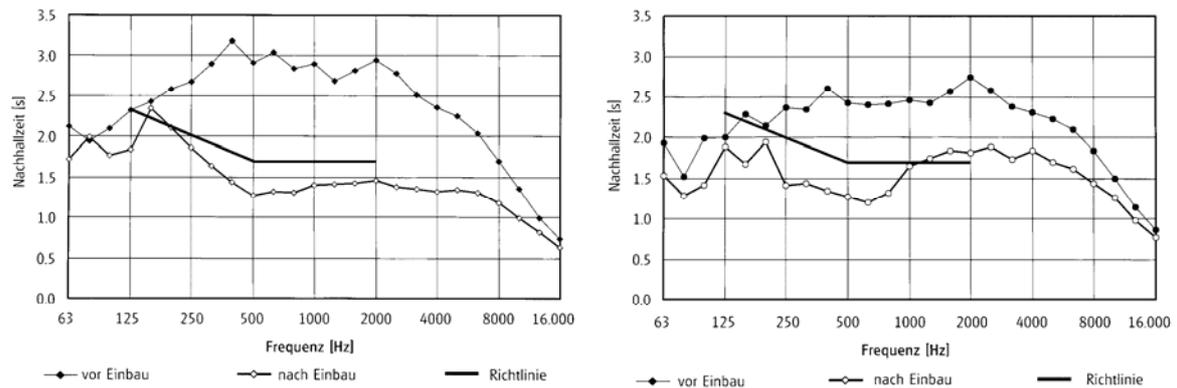


**Abbildung 2-39:** Einsatz mikroperforierter Folienabsorber im Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh<sup>29</sup>

Mit einem Lärmpegel von bis zu 100dB(A) und einer Nachhallzeit bis 3s konnte das Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh weder den Mitarbeitern einen (akustisch) angenehmen Arbeitsplatz, noch den Besuchern einen Ort der Entspannung bieten. Schuld daran sind die Reflexionen, die an den schallharten Begrenzungsflächen aus Beton, Fliesen, Glas und Wasser verursacht werden. Die Vorgaben für die akustische Verbesserung schlossen neben anderen Maßnahmen die Senkung des bisherigen Lärmpegels und eine Verkürzung der Nachhallzeit mit ein. Dazu sollte die geschwungene Decke mit mikroperforierten Folien verkleidet werden.

---

<sup>29</sup> vgl. [FUCHS 5]



**Abbildung 2-40:** Vergleich der Nachhallzeiten vor und nach den akustischen Maßnahmen im Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh; links: Freizeitbereich; rechts: Sportbereich

Die Dicke der Folienabsorber beträgt 0,105mm, der Lochdurchmesser ist 0,2mm, der Lochabstand ist 2mm und die flächenbezogene Masse ist  $0,14\text{kgm}^{-2}$ . Hier kam eine zweischichtige Anordnung mit den Abständen je 10cm bzw. 13cm Abstand zur Wand zum Einsatz (vgl. die Anordnung D in Kapitel 2.6.1).

## 2.8.2 Plenarsaal im deutschen Bundestag (Bonn)

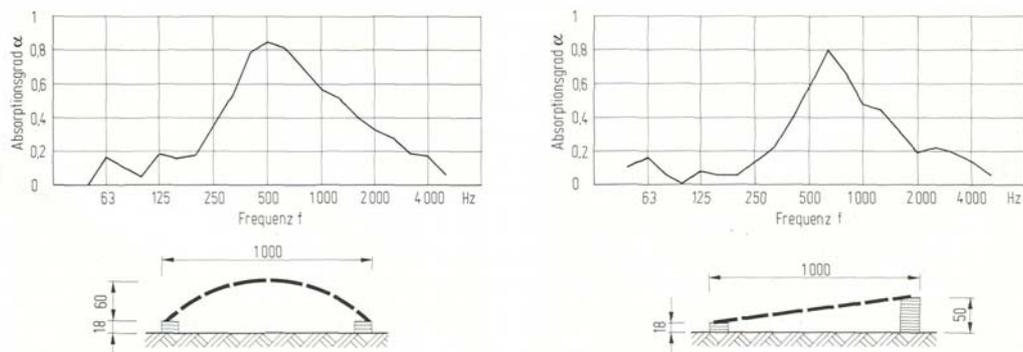


**Abbildung 2-41:** Einsatz mikroperforierter Plattenabsorber im Plenarsaal des Deutschen Bundestages (Bonn)<sup>30</sup>

Im Plenarsaal des deutschen Bundestages in Bonn, dem schon aus Gründen der Bauart – es handelt sich um einen fast kreisrunden Saal – akustische Probleme anhaften, war es notwendig, die Sprachverständlichkeit zu verbessern. Nachdem diese kommunikationsintensive Räumlichkeit mit sehr viel Glas als Baustoff realisiert wurde und die elektroakustische Installation (für Dokumentation und Medien) die gewünschte Akustik nicht herstellen konnte, ka-

<sup>30</sup> vgl. [FUCHS 4]

men konventionelle Absorber, die vorzugsweise künstliche Mineralfasern verwenden, von vorne herein nicht in Frage. Nicht nur aus diesem Grund stellten transparente mikroperforierte Plattenabsorber eine ideale Lösung dar, um die Akustik in diesem Raum zu verbessern. Zur Verbesserung der Raumakustik wurden neben dem Einsatz von mikroperforierten Schallabsorbern zum Beispiel auch die Lautsprecher bzw. deren Aufhängungen optimiert und die bisher noch schallharten Teile des Bodens mit einem gut absorbierenden Gehbelag ausgestattet. Die MPA wurden an den gekrümmten transparenten Bauteilen des Saales abwechselnd mit Schallreflektoren, die den Schall in das absorbierende Gestühl lenken sollen, angeordnet. Zum Einsatz kamen hauptsächlich mikroperforierte Platten wie in Abbildung 2-42 zu sehen, welche auch ein Maximum an Absorption bei 500Hz aufweisen, wie die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Anordnungen. Die kritische Oberfläche (Linseneffekt, durch die runde Form) dieser Raumbegrenzung wurde somit genügend aufgebrochen und akustisch unschädlich gemacht.



**Abbildung 2-42:** Absorptionsgrad (aus Hallraum-Messungen) der mikroperforierten Flächengebilde, die im Deutschen Bundestag Bonn eingesetzt wurden

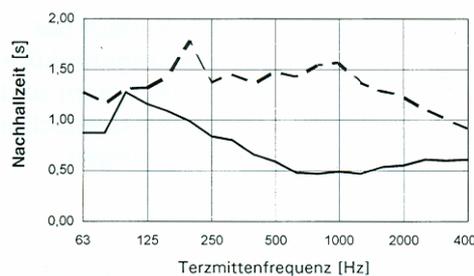
Die Platten haben eine Dicke von 5mm, der Lochdurchmesser beträgt 0,80mm, der Abstand der Löcher ist 6mm, das Lochverhältnis beträgt 1,4%. Die Luftschichtdicke beträgt für den Aufbau links in Abbildung 2-42 18mm bis 78mm; beim rechten Aufbau liegt dieser Wert zwischen 18mm und 50mm.

### 2.8.3 Besprechungskabine



**Abbildung 2-43:** Die Besprechungskabine aus 10mm dicken Glaswänden mit den Abmessungen  $B=3,3\text{m}$ ,  $T=3,3\text{m}$ ,  $H=2,85\text{m}$ <sup>31</sup>

Glaskabinen oder Besprechungskabinen wie in Abbildung 2-43, die in Banken und Sparkassen sehr häufig zum Einsatz kommen, stellen exemplarisch die akustischen Probleme kleiner Räume mit fast würfelförmiger Geometrie dar. Die Schallpegel in solchen Räumen liegen sehr hoch, es treten Klangverfärbungen auf und die Eigenfrequenzen konzentrieren sich in engen Frequenzbändern. Alles in allem führt das zu einer rohen, aggressiven Akustik mit schlechter Sprachverständlichkeit, was eine Kommunikation extrem anstrengend macht.



**Abbildung 2-44:** Die Nachhallzeit vor und nach den akustischen Maßnahmen mit MPA (gestrichelt: vorher, durchgezogen: nach Einbringen der Absorber)

Um diesem Umstand entgegen zu wirken, wurden mikroperforierte Platten aus Acrylglas in zwei verschiedenen Abständen, nämlich 60mm bzw. 20mm etwa auf Kopfhöhe angebracht. Durch die getroffenen Maßnahmen konnte die Nachhallzeit ab 125Hz deutlich gesenkt werden, um die ganz tiefen Frequenzen auch noch zu bedämpfen wurden noch weitere Maßnahmen, wie das Einbringen eines Teppichbodens und Mobiliar, getroffen.

<sup>31</sup> vgl. [FUCHS 6]

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Der erste Teil dieser Diplomarbeit hat dank der detaillierten Messungen Aufschluss über die Feinstruktur des Schallfeldes im Hallraum der Technischen Universität Graz gegeben. Schlussfolgernd kann man sagen, dass es im tieffrequenten Bereich, also bis etwa 500Hz noch nicht diffus genug ist, um auf vielfache Mittelungen über mehrere Mikrofonpositionen zu verzichten. Diese Tatsache geht auch gut mit der Theorie nach *Schroeder* einher, die besagt, dass die Eigenfrequenzen eines Raumes – abhängig von dessen Volumen und mittlerer Nachhallzeit – ab einer gewissen Frequenz, nämlich der *Schroeder*-Frequenz, nicht mehr zu trennen sind. Dies findet sich auch in der Abhängigkeit des Schallfeldes von der Quellposition wieder. Während die Nachhallzeiten zu tiefen Frequenzen hin durchaus stärkeren Fluktuationen unterworfen sind, stellt sich im oberen Frequenzbereich heraus, dass man ein diffuses Schallfeld unabhängig von der Quellposition erreichen kann. Anhand der Abbildungen in Kapitel 1 lassen sich sowohl für die Mikrofone als auch für die Quelle geeignete Positionen finden, an denen man gute Messergebnisse erreichen kann.

Die Simulation hat gezeigt, dass selbst mit unserer hoch entwickelten Computertechnologie noch nicht alles im Voraus berechenbar ist, zumindest nicht für einen Raum, der solch extreme Werte annehmen kann.

Im zweiten Teil wurden Absorber aus der Gruppe der ALFA-Bauteile vorgestellt. Die mikroperforierten Folienabsorber. Hier haben die Messungen, die bewusst unter realen Bedingungen durchgeführt wurden, gezeigt, dass Werte, wie sie in der Literatur zu finden sind – unter nur mehr oder weniger dem realen Einsatz entsprechenden Bedingungen gemessen, nicht erreicht werden. Dennoch liegen die Vorteile dieser Absorber klar auf der Hand, weswegen sie mit Sicherheit noch sehr viel Einsatz finden werden, in einer Zeit, in der Glas und Transparenz eine so wichtige Rolle in der Architektur übernommen haben.

## 4 Literaturverzeichnis

[BORK] BORK Ingolf: *Möglichkeiten und Grenzen der raumakustischen Simulation*. Bericht der 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998, Hrsg. Bildungswerk des VDT, K. G. Saur Verlag, München 1999

[BORK 2] BORK Ingolf: *Vergleich von Rechnung und Messung beim 3. Ringvergleich zur raumakustischen Simulation*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig (<http://www.ptb.de>)

[CREMER 1] CREMER Lothar, MÜLLER Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band I*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978

[CRANDALL] CRANDALL I.B.: *Theory of Vibrating Systems and Sound*. D. Van Nostrand Company, Toronto, New York, London, 1926/1954

[DALENBÄCK] DALENBÄCK Bengt-Inge: *CATT-Acoustic v8.0 User's Manual*. Schweden 2002

[FARINA] FARINA A.: *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distorsion with a Swept-Sine Technique*. J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol.48, 2000

[FASOLD] FASOLD Wolfgang, SONNTAG Ernst, WINKLER Helgo: *Bau- und Raumakustik*. VEB Verlag für Bauwesen, 1987

[FUCHS 1] FUCHS H., ZHA X.: *Raumakustik – Neue Bauteile für besseres Hören und weniger Lärm*. Tagungsband zur Bauphysiktagung an der TU Graz, 2002

[FUCHS 2] FUCHS H.: *Alternative Fibreless Absorbers – New Tools and Materials for Noise Control and Acoustic Comfort*. acta acustica, vol. 87, 2001

[FUCHS 3] FUCHS H., ZHA X.: *Schallabsorber aus Acrylglas im Plenarsaal des Bundestages*. IBP Mitteilung 258, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1994

[FUCHS 4] FUCHS H., ZHA X.: *Transparente Vorsatzschalen als alternative Schallabsorber im Plenarsaal des Bundestages*. Bauphysik 16, Heft 3, 1994

[FUCHS 5] FUCHS H., ZHA X., WENSKI H., MAURITZ U.: *Die Welle, Gütersloh - Überzeugende Lärminderung im Freizeitbad*. Fachzeitschrift für Praxis, Technik, Wissenschaft und Betriebswirtschaft, 11/1998

- [FUCHS 6] FUCHS H., ZHA X., ZHOU X.: *Raumakustisches Design für eine Glaskabine*. Sonderdruck aus Glasverarbeitung 3, 1996
- [GRABER] GRABER Gerhard: *Raumakustik*. Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung an der TU Graz, SS 2004
- [MEYER] MEYER Erwin, NEUMANN Ernst-Georg: *Physikalisch und Technische Akustik*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden, 1979
- [MORSET] MORSET L.H. et alii: *WinMLS2000 User's Guide – Handbuch zum Software-Paket WinMLS*. 2002
- [MÜLLER] MÜLLER Gerhard, MÖSER Michael (Hrsg.): *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2004
- [NORM] EN 20354: *Messung der Schallabsorption im Hallraum*. CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 1993
- [NORM 2] EN 20354/A1: *Messung der Schallabsorption im Hallraum – Änderung 1: Montagearten von Prüfgegenständen für Schallabsorptionsmessungen*. CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 1997
- [POWELL] POWELL John G.: *Choosing a Formula for Calculating the Absorption Coefficient from Reverberation Chamber Measurements*. J. Audio Eng. Soc., vol.18, 1970
- [QUIRING] QUIRING Karl-Bernd: *Raumakustik und Beschallungstechnik*. Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung an der TU Graz, SS 1996
- [RAYLEIGH] LORD RAYLEIGH: *Theory of Sound*, McMillan, London 1894
- [SCHROEDER] SCHROEDER M. R.: *Integrated-Impulse Method for Measuring Sound Decay without Using Impulses*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 66, 1979
- [STAN] STAN Guy-Bart, EMBRECHTS Jean-Jaques, ARCHAMBEAU Dominique: *Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques*. J. Audio Eng. Soc., vol. 50, 2002

# 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Die drei Unterbereiche der Raumakustik .....	9
Abbildung 1-2: Early Decay Time und Nachhallzeit .....	12
Abbildung 1-3: Das Raster für die erste Messung (Bestimmung des Schallfeldes) .....	13
Abbildung 1-4: Das Raster für die zweite Messung (Einfluss der Quellposition auf das Schallfeld) .....	14
Abbildung 1-5: links: Messplatz mit PC, Wandler und Audio-Interface, rechts: Mikrofonaufstellung .....	14
Abbildung 1-6: links: symbolischer Messaufbau, rechts: Signalquelle 2 Genelec 1030A (back-to-back) .....	15
Abbildung 1-7: Vergleich der Frequenzgänge von Genelec 1030A und Norsonic Dodekaeder .....	15
Abbildung 1-8: Das frequenzabhängige Abstrahlverhalten der Mess-Lautsprecher Genelec 1032A .....	16
Abbildung 1-9: Vier gleiche Messungen mit MLS-Folge (WinMLS2004 liefert für 8kHz und 16kHz keine Werte bei MLS-Messungen) .....	16
Abbildung 1-10: Vier gleiche Messungen mit Sinus-Sweep .....	17
Abbildung 1-11: Die gemittelten Werte für MLS und Sweep im Vergleich .....	17
Abbildung 1-12: Signalweg über lineare zeitinvariante (LTI-) Systeme, vgl. [MÜLLER, S.44] .....	18
Abbildung 1-13: links: Erzeugung einer Maximalfolge mit einem Schieberegister (Ordnung $m = 8$ , Länge 255) rechts oben: eine Periode der Maximalfolge, rechts unten: Autokorrelationsfunktion der Maximalfolge .....	21
Abbildung 1-14: Messung mit MLS-Folge für 40Hz in 0,5m Höhe .....	23
Abbildung 1-15: Messung mit Sinus-Sweep für 40Hz in 0,5m Höhe .....	23
Abbildung 1-16: Messung mit MLS-Folge für 50Hz in 0,5m Höhe .....	24
Abbildung 1-17: Messung mit Sinus-Sweep für 50Hz in 0,5m Höhe .....	24
Abbildung 1-18: Messung mit MLS-Folge für 63Hz in 0,5m Höhe .....	25
Abbildung 1-19: Messung mit Sinus-Sweep für 63Hz in 0,5m Höhe .....	25
Abbildung 1-20: Messung mit MLS-Folge für 125Hz in 0,5m Höhe .....	26
Abbildung 1-21: Messung mit Sinus-Sweep für 125Hz in 0,5m Höhe .....	26
Abbildung 1-22: Messung mit MLS-Folge für 250 Hz in 0,5m Höhe .....	27
Abbildung 1-23: Messung mit Sinus-Sweep für 250Hz in 0,5m Höhe .....	27
Abbildung 1-24: Messung mit MLS-Folge für 500Hz in 0,5m Höhe .....	28
Abbildung 1-25: Messung mit Sinus-Sweep für 500Hz in 0,5m Höhe .....	28
Abbildung 1-26: Messung mit MLS-Folge für 1kHz in 0,5m Höhe .....	29
Abbildung 1-27: Messung mit Sinus-Sweep für 1kHz in 0,5m Höhe .....	29
Abbildung 1-28: Messung mit MLS-Folge für 2kHz in 0,5m Höhe .....	30
Abbildung 1-29: Messung mit Sinus-Sweep für 2kHz in 0,5m Höhe .....	30
Abbildung 1-30: Messung mit MLS-Folge für 4kHz in 0,5m Höhe .....	31
Abbildung 1-31: Messung mit Sinus-Sweep für 4kHz in 0,5m Höhe .....	31
Abbildung 1-32: Abweichung der Nachhallzeit T30 vom Mittelwert in Prozentpunkten .....	32
Abbildung 1-33: Messung mit MLS-Folge für 40Hz in 1,2m Höhe .....	34
Abbildung 1-34: Messung mit MLS-Folge für 50Hz in 1,2m Höhe .....	35
Abbildung 1-35: Messung mit MLS-Folge für 63Hz in 1,2m Höhe .....	35
Abbildung 1-36: Messung mit MLS-Folge für 125Hz in 1,2m Höhe .....	36
Abbildung 1-37: Messung mit MLS-Folge für 250Hz in 1,2m Höhe .....	36
Abbildung 1-38: Messung mit MLS-Folge für 500Hz in 1,2m Höhe .....	37
Abbildung 1-39: Messung mit MLS-Folge für 1kHz in 1,2m Höhe .....	37
Abbildung 1-40: Messung mit MLS-Folge für 2kHz in 1,2m Höhe .....	38
Abbildung 1-41: Messung mit MLS-Folge für 4kHz in 1,2m Höhe .....	38
Abbildung 1-42: Messung mit Sinus-Sweep für 40Hz in 2,0m Höhe .....	39
Abbildung 1-43: Messung mit Sinus-Sweep für 50Hz in 2,0m Höhe .....	39
Abbildung 1-44: Messung mit Sinus-Sweep für 63Hz in 2,0m Höhe .....	40
Abbildung 1-45: Messung mit Sinus-Sweep für 125Hz in 2,0m Höhe .....	40
Abbildung 1-46: Messung mit Sinus-Sweep für 250Hz in 2,0m Höhe .....	41
Abbildung 1-47: Messung mit Sinus-Sweep für 500Hz in 2,0m Höhe .....	41
Abbildung 1-48: Messung mit Sinus-Sweep für 1kHz in 2,0m Höhe .....	42
Abbildung 1-49: Messung mit Sinus-Sweep für 2kHz in 2,0m Höhe .....	42
Abbildung 1-50: Messung mit Sinus-Sweep für 4kHz in 2,0m Höhe .....	43
Abbildung 1-51: Minima, Maxima und Mittelwerte der Nachhallzeiten T30 (über alle 88 Messpunkte, alle gemessenen Höhen und Messmethoden) .....	44
Abbildung 1-52: links und Mitte: Beispiel der Messanordnung zur Messung 1 rechts: Beispiel der Messanordnung zur Messung 2 .....	45
Abbildung 1-53: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 1 (Rasterpunkt 18) .....	45
Abbildung 1-54: Early Decay Time für die Mikrofonposition 1 (Rasterpunkt 18) .....	46
Abbildung 1-55: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 2 (Rasterpunkt 29) .....	46
Abbildung 1-56: Early Decay Time für die Mikrofonposition 2 (Rasterpunkt 29) .....	47
Abbildung 1-57: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 3 (Rasterpunkt 11) .....	47
Abbildung 1-58: Early Decay Time für die Mikrofonposition 3 (Rasterpunkt 11) .....	48
Abbildung 1-59: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 4 (Rasterpunkt 27) .....	48
Abbildung 1-60: Early Decay Time für die Mikrofonposition 4 (Rasterpunkt 27) .....	49
Abbildung 1-61: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 5 (Rasterpunkt 38) .....	49
Abbildung 1-62: Early Decay Time für die Mikrofonposition 5 (Rasterpunkt 38) .....	50
Abbildung 1-63: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 6 (Rasterpunkt 1) .....	50
Abbildung 1-64: Early Decay Time für die Mikrofonposition 6 (Rasterpunkt 1) .....	51
Abbildung 1-65: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 7 (Rasterpunkt 20) .....	51
Abbildung 1-66: Early Decay Time für die Mikrofonposition 7 (Rasterpunkt 20) .....	52

Abbildung 1-67: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 8 (Rasterpunkt 36) .....	52
Abbildung 1-68: Early Decay Time für die Mikrofonposition 8 (Rasterpunkt 36) .....	53
Abbildung 1-69: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 9 (Rasterpunkt 59) .....	53
Abbildung 1-70: Early Decay Time für die Mikrofonposition 9 (Rasterpunkt 59) .....	54
Abbildung 1-71: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 10 (Rasterpunkt 70) .....	54
Abbildung 1-72: Early Decay Time für die Mikrofonposition 10 (Rasterpunkt 70) .....	55
Abbildung 1-73: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 11 (Rasterpunkt 52) .....	55
Abbildung 1-74: Early Decay Time für die Mikrofonposition 11 (Rasterpunkt 52) .....	56
Abbildung 1-75: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 12 (Rasterpunkt 68) .....	56
Abbildung 1-76: Early Decay Time für die Mikrofonposition 12 (Rasterpunkt 68) .....	57
Abbildung 1-77: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 13 (Rasterpunkt 79) .....	57
Abbildung 1-78: Early Decay Time für die Mikrofonposition 13 (Rasterpunkt 79) .....	58
Abbildung 1-79: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 14 (Rasterpunkt 50) .....	58
Abbildung 1-80: Early Decay Time für die Mikrofonposition 14 (Rasterpunkt 50) .....	59
Abbildung 1-81: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 15 (Rasterpunkt 61) .....	59
Abbildung 1-82: Early Decay Time für die Mikrofonposition 15 (Rasterpunkt 61) .....	60
Abbildung 1-83: Nachhallzeit T30 für die Mikrofonposition 16 (Rasterpunkt 77) .....	60
Abbildung 1-84: Early Decay Time für die Mikrofonposition 16 (Rasterpunkt 77) .....	61
Abbildung 1-85: 3D-Ansichten der Simulation .....	64
Abbildung 1-86: Der Verlauf des Schalldruckpegels im Hallraum (simuliert mit CARA 2.2) .....	66
Abbildung 1-87: Die verschiedenen Nachhallzeiten der Simulation mit Segelflächen .....	67
Abbildung 1-88: Die verschiedenen Nachhallzeiten der Simulation ohne Segelflächen .....	69
Abbildung 1-89: Vergleich zwischen Messung und Simulation anhand der Nachhallzeiten T30 und EDT für drei verschiedene (zufällig ausgewählte) Empfänger- bzw. Mikrofonpositionen .....	72
Abbildung 1-90: Absorption im leeren Hallraum aus einem Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit der minimalen Nachhallzeit .....	74
Abbildung 2-1: Prinzip der mikroperforierten Absorber oben: schematische Ansicht eines perforierten Absorbers unten: Geschwindigkeitsverteilung von Luftschichten in zylindrischen Öffnungen unterschiedlichen Durchmessers .....	77
Abbildung 2-2: Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden des Absorptionsgrades .....	83
Abbildung 2-3: T30-Messergebnisse an drei verschiedenen Tagen (Mikrofonposition 1) .....	84
Abbildung 2-4: T30-Messergebnisse an drei verschiedenen Tagen (Mikrofonposition 2) .....	85
Abbildung 2-5: Die prozentuale Abweichung der Ergebnisse November und Dezember (1) von den Ergebnissen im Juli; links für Mikrofonposition 1 und rechts für Mikrofonposition 2 .....	85
Abbildung 2-6: Bereiche der prozentualen Abweichung; oben: Messungen vom 01. Dezember 2004; Mitte: Messungen vom 02. Dezember 2004; unten: Messungen vom 23. November 2004 .....	86
Abbildung 2-7: links: Dämpfungskonstante der Luft als Funktion der relativen Luftfeuchte mit der Frequenz als Parameter (Temperatur 20°C); rechts: Durch die Luftabsorption bedingte zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche $8\alpha_L \cdot V$ in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Frequenz für ein Rauminhalt von $V=1000\text{m}^3$ .....	88
Abbildung 2-8: „Falsche“ Ergebnisse der Absorptionsgradmessungen .....	89
Abbildung 2-9: Aufhängung der mikroperforierten Folien im Hallraum – Aufteilung in 2 Teilflächen .....	91
Abbildung 2-10: Links: die rechte große Teilfläche; Mitte: beide Teilflächen und der „störende“ Diffusor; rechts: die rechte, kleinere Teilfläche .....	92
Abbildung 2-11: Aufbau A, einschichtig mit Abstand $D=10\text{cm}$ zur Wand .....	93
Abbildung 2-12: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D=10\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2 .....	93
Abbildung 2-13: Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 10cm (rechte Abbildung mit genaueren Skalierung) .....	94
Abbildung 2-14: Aufbau B, einschichtig mit Abstand $D=20\text{cm}$ zur Wand .....	94
Abbildung 2-15: Schalldruck $p$ und Schallschnelle $v$ vor einer schallharten Wand (zum Prinzip des $\lambda/4$ -Absorbers) .....	95
Abbildung 2-16: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D=20\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2 .....	95
Abbildung 2-17: Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 20cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	96
Abbildung 2-18: Aufbau C, einschichtig mit Abstand $D=40\text{cm}$ zur Wand .....	96
Abbildung 2-19: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D=40\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2 .....	97
Abbildung 2-20: Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung im Abstand 40cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	97
Abbildung 2-21: Aufbau D, zweischichtig mit den Abständen $D_1=10\text{cm}$ und $D_2=13\text{cm}$ zur Wand .....	98
Abbildung 2-22: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D_1=10\text{cm}$ und $D_2=13\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2 .....	98
Abbildung 2-23: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 10cm und 13cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	99
Abbildung 2-24: Aufbau E, zweischichtig mit den Abständen $D_1=10\text{cm}$ und $D_2=15\text{cm}$ zur Wand .....	99
Abbildung 2-25: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D_1=10\text{cm}$ und $D_2=15\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2 .....	100
Abbildung 2-26: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 10cm und 15cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	100
Abbildung 2-27: Aufbau F, zweischichtig mit den Abständen $D_1=20\text{cm}$ und $D_2=30\text{cm}$ zur Wand .....	101
Abbildung 2-28: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D_1=20\text{cm}$ und $D_2=30\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2 .....	101
Abbildung 2-29: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 20cm und 30cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	102
Abbildung 2-30: Aufbau G, zweischichtig mit den Abständen $D_1=25\text{cm}$ und $D_2=30\text{cm}$ zur Wand .....	102
Abbildung 2-31: Vergleich der Nachhallzeiten des leeren Raums und der Absorbermessung (hier $D_1=25\text{cm}$ und $D_2=30\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2 .....	103
Abbildung 2-32: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung in den Abständen 25cm und 30cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	103

Abbildung 2-33: Aufbau H, einschichtig mit den Abständen $D_o=10\text{cm}$ und $D_u=30\text{cm}$ zur Wand .....	104
Abbildung 2-34: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raumes und der Absorbermessung (hier $D_o=10\text{cm}$ und $D_u=30\text{cm}$ ) jeweils für Mikrofonposition 1 und 2.....	104
Abbildung 2-35: Absorptionsgrad für eine einschichtige Anordnung mit nicht-konstantem Wandabstand (oben 10cm, unten 30cm – rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) .....	105
Abbildung 2-36: Aufbau I, zweischichtig mit den Abständen $D_{1o}=10\text{cm}$ , $D_{1u}=30\text{cm}$ und $D_2=40\text{cm}$ zur Wand .....	105
Abbildung 2-37: Vergleich der Nachhallzeiten T30 des leeren Raumes und der Absorbermessung (hier $D_{1o}=10\text{cm}$ , $D_{1u}=30\text{cm}$ und $D_2=40\text{cm}$ ) jeweils für die Mikrofonpositionen 1 und 2.....	106
Abbildung 2-38: Absorptionsgrad für eine zweischichtige Anordnung, wobei die wandnahe Folie nicht-konstanten Abstand zur Wand hat (oben 10cm, unten 30cm); die zweite Folie ist parallel zur Wand im Abstand 40cm (rechte Abbildung mit genauerer Skalierung) ..	106
Abbildung 2-39: Einsatz mikroperforierter Folienabsorber im Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh .....	107
Abbildung 2-40: Vergleich der Nachhallzeiten vor und nach den akustischen Maßnahmen im Freizeitbad „Die Welle“ in Gütersloh; links: Freizeitbereich; rechts: Sportbereich.....	108
Abbildung 2-41: Einsatz mikroperforierter Plattenabsorber im Plenarsaal des Deutschen Bundestages (Bonn).....	108
Abbildung 2-42: Absorptionsgrad (aus Hallraum-Messungen) der mikroperforierten Flächengebilde, die im Deutschen Bundestag Bonn eingesetzt wurden .....	109
Abbildung 2-43: Die Besprechungskabine aus 10mm dicken Glaswänden mit den Abmessungen $B=3,3\text{m}$ , $T=3,3\text{m}$ , $H=2,85\text{m}$ .....	110
Abbildung 2-44: Die Nachhallzeit vor und nach den akustischen Maßnahmen mit MPA (gestrichelt: vorher, durchgezogen: nach Einbringen der Absorber).....	110
Abbildung 7-1: Typischer Messaufbau einer Hallraum-Messung .....	120

## 6 Anhang A: Inhaltsverzeichnis der CD

Es wird der Inhalt der beiliegenden CD erklärt. An sich sind der Inhalt und die Ordnerstruktur der CD selbsterklärend angelegt. Dennoch gibt es einige Anmerkungen zu machen.

- Simulation

- CATT Acoustic Daten

In diesem Ordner finden sich die Daten, die zur Simulation des Hallraums der TU Graz im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellt wurden.

- Messung

- Juli2004

- Hallraum (leer)

Dieser Ordner enthält die aus WinMLS2004 exportierten Messdaten der Messungen im Juli 2004. Diese umfassen einerseits das gesamte 88-Punkte-Raster in 3 verschiedenen Messhöhen und andererseits, die Messungen des Subsets von 16 Messpositionen mit 5 verschiedenen Quellpositionen.

- November2004

- Hallraum (mit Absorber)

Hier sind die aus WinMLS2004 exportierten Messdaten der Absorbermessung im November 2004 zu finden.

- Dezember2004

- Hallraum (leer)

Nachdem sich herausgestellt hat, dass die November-Messungen des leeren Hallraums stark von den Werten des leeren Hallraums aus der Juli-Messung abweichen, wurde eine weitere Messung im Dezember durchgeführt. Diese Daten finden sich in diesem Ordner

- Visualisierung
  - Juli2004

- Hallraum (leer)

Die für das Matlab-Visualisierungstool aufbereiteten Daten der 88 Messpunkte (wiederum 3 verschiedene Messhöhen) im leeren Hallraum aus der Juli-Messung.

- Office Daten
  - Diplomarbeit

Diese Diplomarbeit in elektronischer Form als MS Word-Datei.

- Präsentation

Die MS PowerPoint-Präsentation der Diplomarbeit.

## 7 Anhang B: Hallraum-Messung mit WinMLS2004

Hier sollen einige Anregungen und Überlegungen für Messungen im Hallraum speziell mit der Software WinMLS2004 stichpunktartig zusammengefasst werden, wobei die Erfahrungen die im Rahmen dieser Arbeit gemacht wurden, mit einfließen sollen. Eine gewisse Vertrautheit mit der Software wird vorausgesetzt. Hierzu empfiehlt sich der „Measurement-Walk-Through“ im Handbuch der Software. Die Bedienung der weiteren Geräte wie A/D-Wandler oder RME-Digiface (HDSP-Mixer) wird als bekannt vorausgesetzt.

Im Vorfeld abzuklären:

- Wie viele Kanäle können gleichzeitig mit der Software gemessen werden?
  - In der aktuell am Institut für Breitbandkommunikation vorhandenen Version von WinMLS2004 können zwei Kanäle gleichzeitig gemessen werden.
- Wie viele Punkte gibt es zu messen?

Lohnt es mehr als zwei Mikrofone aufzustellen, selbst wenn nur zweikanalig gemessen werden kann?

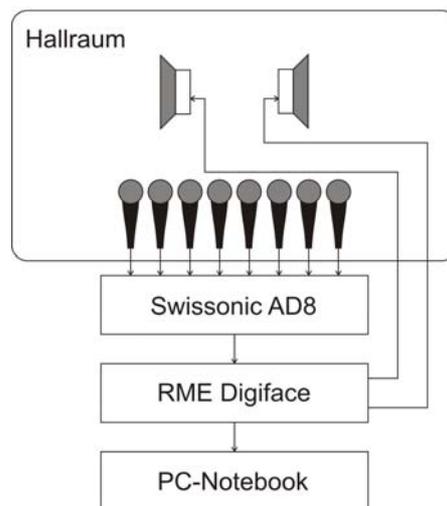
→ Es ist oft einfacher, z. B. acht Mikrofone aufzubauen, zu kalibrieren usw. und anschließend bei der Messung nur den Eingang der Soundkarte umzustellen, als jedes Mal zwei Mikrofone an anderen Messpunkten zu positionieren, zumal beim Umstellen schon erste Ungenauigkeiten bei der Aufstellung auftreten können.

- Genügend Zeit für Aufbau, Kalibrierung und Testmessungen einkalkulieren.
- Kann eine Auswertung schon vorher vorbereitet werden?
  - Welche Ergebnisse sind zu erwarten? Stimmen die Messungen mit den erwarteten, berechneten oder ein anderes Mal gemessenen Werten überein? Wo liegen mögliche Fehlerquellen?
- Können alle Messungen mit dem gleichen Setup gefahren werden?
  - Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse offenbar sehr von der ‚Tagesform‘ abhängen, es empfiehlt sich daher dringend, die Messungen dicht aufeinander durchzuführen, am besten so, dass der Messapparat nicht verändert werden muss.
- Empfehlenswert ist, eine detaillierte Ordner-Struktur vorzubereiten, in der die gemessenen Impulsantworten gespeichert werden.
- Eine konsequent durchgehaltene Namensgebung der Impulsantworten erleichtert es die richtigen Daten bei der Auswertung zu finden.
- Die Standard-Speicher-Pfade können in WinMLS2004 schon vorher eingegeben werden. Grundsätzlich lassen sich die Einstellungen für die Messungen in einem „template“ speichern, das dann zu gegebenem Zeitpunkt aufgerufen werden kann.

Bei der Messung selbst zu beachten:

- Kalibrierung der Mikrofone mit dem Kalibrator. Es ist den Anweisungen in WinMLS2004 zu folgen.
  - Der Kalibrator des Instituts für Breitbandkommunikation liefert einen Pegel von 94dB bei einer Frequenz von 1000Hz.
  - Ist die Dämpfung, der Trittschall-Filter des Mikrofons richtig eingestellt? Wird die richtige Richtcharakteristik bzw. Kapsel (Kugel, Niere verwendet)? Für diese Art der Messung sind Mikrofone mit omnidirektionaler Richtcharakteristik zu verwenden.
- Kalibrierung der Lautsprecher mit dem Pegelmesser. Es ist den Anweisungen in WinMLS2004 zu folgen. Bei zu lautem Ausgangspegel ist gegebenenfalls der Pegel im HDSP-Mixer abzuschwächen.
  - Für die Messungen die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden, stand zu diesem Zweck ein Pegelmesser des Instituts für elektronische Musik und Akustik der Kunstuniversität Graz zur Verfügung.

- Wie lange sind die Nachhallzeiten, die bei der Messung zu erwarten sind. Das Erreger-Signal muss dementsprechend gewählt werden. Die Dauer der Messung muss mindestens das Dreifache betragen. Im Hallraum des Labors für Bauphysik sind bei tiefen Frequenzen Nachhallzeiten von bis zu 35 Sekunden zu erwarten, das heißt die Messdauer liegt hier bei 105 Sekunden.
- Was macht WinMLS2004 nach der Messung?
  - Es gibt Einstellungen zum automatischen oder manuellem Speichern, dabei können Zähler automatisch erhöht werden. Sollen die Ergebnisse der Messung gleich dargestellt werden? Falls ja, welche? Die Dauer der Messung bzw. Berechnung erhöht sich immens, wenn jedes Mal beispielsweise „Room Acoustics“ dargestellt werden sollen.
- Überprüfen des Ablaufs der Messung im Hallraum.
  - Ein Brummen auf den Boxen oder ähnliches müssen die Ergebnisse an sich noch nicht merklich verfälschen, aber der Signal-Rausch-Abstand wird deutlich geringer, was sich dann vor allem im tieffrequenten Bereich ungünstig auswirken kann.



**Abbildung 7-1:** Typischer Messaufbau einer Hallraum-Messung