



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Messung und Optimierung raumakustischer  
Parameter am Beispiel Aula Lounge

verfasst von

Christoph Kiener, BA

angestrebter akademischer Grad

Magister der Philosophie (Mag.phil.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 316

Studienrichtung lt. Studienblatt: Diplomstudium Musikwissenschaft

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>1. SCHALL UND SCHALLAUSBREITUNG.....</b>	<b>5</b>
1.1 SCHALLWELLEN.....	5
1.2 SCHALLDRUCK, SCHALLSCHNELLE UND SCHALLPEGEL.....	7
1.2.1 Schalldruck und Schallschnelle .....	7
1.2.2 Schallpegel.....	9
<b>2. REFLEXION, BEUGUNG, BRECHUNG UND ABSORPTION.....</b>	<b>10</b>
2.1 REFLEXION .....	10
2.1.1 Reflexion an ebenen Flächen .....	10
2.1.2 Reflexion an gekrümmten Flächen .....	11
2.2 BEUGUNG .....	13
2.3 BRECHUNG .....	15
2.4 ABSORPTION .....	15
2.4.1 Höhenabsorber.....	18
2.4.2 Mittenabsorber.....	19
2.4.3 Tiefenabsorber.....	19
2.4.4 Publikumsabsorption .....	20
<b>3. RAUMAKUSTIK.....</b>	<b>21</b>
3.1 RAUMAKUSTISCHE PARAMETER .....	21
3.1.1 Hall .....	21
3.1.1.1 Nachhall .....	22
3.1.2 Hallradius.....	26
3.1.3 Impulsantwort .....	28
3.2 RAUMAKUSTIK FÜR SPRACHE UND MUSIK .....	29
3.2.1 Raumakustik für Musik .....	29
3.2.2 Raumakustik für Sprache.....	30

3.2.3 Sprachverständlichkeit, Klarheitsmaß Deutlichkeitsmaß, Sprachübertragungsindex, Artikulationsverlust bei Konsonanten.....	31
3.2.3.1 Sprachverständlichkeit .....	32
3.2.3.2 Artikulationsverlust bei Konsonanten .....	33
3.2.3.3 Klarheitsmaß ( $C_{80}$ ) .....	34
3.2.3.4 Deutlichkeit ( $D_{50}$ ) .....	35
3.2.3.5 Sprachübertragungsindex (STI) .....	36
3.3 RAUMAKUSTIK VON AUFNAHMESTUDIOS .....	37
3.3.1 Nachhallzeit von Aufnahmestudios .....	38
<b>4. MESSUNG RAUMAKUSTISCHER PARAMETER AM BEISPIEL DER AULA LOUNGE IN DER AULA DER WISSENSCHAFTEN .....</b>	<b>40</b>
4.1 VERSUCHSAUFBAU .....	42
4.2 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN .....	43
4.3 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE DER MESSUNGEN .....	44
<b>5. MÖGLICHKEITEN DER OPTIMIERUNG .....</b>	<b>54</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>58</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>62</b>
ABSORPTIONSGRADE GÄNGIGER MATERIALIEN .....	63
MESSPROTOKOLLE.....	65
ABSTRACT .....	82
LEBENS LAUF.....	84

# EINLEITUNG

Akustik ist die Lehre vom Schall, wobei es verschiedene Arten von Schall zu unterscheiden gilt. Als erstes ist hier der Luftschall zu nennen, von dem in dieser Arbeit die Rede sein wird. Dieser bedient sich, wie der Name schon sagt, des Mediums Luft, zur Ausbreitung. Dann wäre noch der Körperschall zu erwähnen, der sich in Festkörpern ausbreitet und Wasserschall, welcher sich eines flüssigen Mediums bedient.

Ziel dieser Arbeit ist es, die raumakustischen Parameter der Aula Lounge, einem Veranstaltungssaal im Erdgeschoß der Aula der Wissenschaften in der Wollzeile 27A, 1010 Wien, zu ermitteln und gegebenenfalls, zumindest theoretisch, zu optimieren. Ermittelt wurden die Parameter in der Lehrveranstaltung Nummer 160147 PR Praktische Einführung in die raumakustische Messtechnik und Analyse im Sommersemester 2012 unter Mithilfe aller daran beteiligten Studentinnen und Studenten. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe des Freeware-Programms Cool Edit 96 und des Aurora Plug-Ins, sowie mit von Herrn Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz zur Verfügung gestellten Materialien.

Da die Raumakustik ein sehr umfangreiches Thema darstellt, werde ich mich im Vorfeld nur mit jenen Parametern beschäftigen, die für die Messung und Auswertung relevant sind. Ebenso werde ich mit den raumakustischen Verbesserungs- und Änderungsmöglichkeiten verfahren.

# 1. SCHALL UND SCHALLAUSBREITUNG

Wenn man von Schall spricht, meint man im Allgemeinen den hörbaren Luftschall, also Schallwellen mit einer Frequenz zwischen 20 Hertz und 20000 Hertz. Schall mit Frequenzen unter 20 Hz wird als Infraschall, jener mit Frequenzen über 20 kHz als Ultraschall bezeichnet.<sup>1</sup> Ab einer Frequenz von  $10^9$  Hz spricht man von Hyperschall.<sup>2</sup>

Im Hörschall gibt es unterschiedliche Schallsignale, die es zu unterscheiden gilt. Der reine Ton ist eine Sinusschwingung im Hörbereich, die als solche in der Natur nicht vorkommt. Ein Tongemisch ist eine Vermengung verschiedener, beliebig vieler reiner Töne unterschiedlicher Frequenz. Als Klang bezeichnet man Hörschall, der sich aus einem Grundton und Obertönen zusammensetzt. Ein Klanggemisch ist in der Folge Schall, der aus mehreren Klängen besteht. Ein Geräusch ist ein oft nicht bestimmtes Schallereignis, das nicht zur Übertragung von Informationen erzeugt würde.<sup>3</sup>

Für akustische Messungen ist das weiße Rauschen neben einem kurzen Impuls, der idealerweise alle Frequenzbereiche des von Menschen hörbaren Bereichs anregt, von Bedeutung. Es gilt unterschiedliche Arten des Rauschens zu unterscheiden, wie zum Beispiel das rosa Rauschen und das weiße Rauschen. Weißes Rauschen bietet über jeden Frequenzbereich einen gleichbleibenden Durchschnittspegel wohingegen das Rosa Rauschen zu den höheren Frequenzen hin um 6 dB/Oktave im Pegel abfällt, wodurch für den menschlichen Zuhörer der Eindruck entsteht, dass alle hörbaren Frequenzen gleich laut dargeboten werden.<sup>4</sup>

## 1.1 SCHALLWELLEN

Wenn ein Schallereignis in einem Medium passiert, das Schall leitet, so regt es die um sich liegenden Teilchen zum Schwingen an. So entsteht eine Schallwelle, die sich in der Luft kugelförmig ausbreitet, indem ein Teilchen um seine Ruhelage schwingt und dabei

---

<sup>1</sup> Vgl. Evedrest, 2001, S. 17

<sup>2</sup> Vgl. DIN 1320 Akustik Begriffe, S. 2

<sup>3</sup> Vgl. ebd.

<sup>4</sup> Vgl. das P.A. Handbuch, 2005, S. 345

die um sich liegenden Teilchen anregt.<sup>5</sup> Es entsteht außerdem ein Schallfeld, welches sich in zwei Arten gliedern lässt. Im freien Schallfeld erreicht ein Schallereignis den Hörer ohne Hindernisse. Man spricht hier von Direktschall. Im Gegensatz dazu steht das diffuse Schallfeld, in dem der Schall den Hörer über Reflexionen, Beugungen und Bündelungen von Decken, Wänden, Böden und anderen Gegenständen, erreicht, das heißt, das diffuse Schallfeld ist eigentlich eine Überlagerung der Schallwellen vieler Reflexionen.<sup>6</sup>

Es gilt nun zwei Geschwindigkeiten voneinander zu unterscheiden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle, die Schallgeschwindigkeit  $c$ , und die Geschwindigkeit mit der die Teilchen um ihre Ruhelage schwingen, die Schallschnelle  $v$ .

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  beträgt in der Luft 344 m/s bei 20°C.<sup>7</sup> Wohingegen die Schallschnelle  $v$  im Vergleich sehr langsam ist, sie beträgt nämlich nur  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s bei einem Schalldruck von 0,2 Pa.<sup>8</sup>

Es lässt sich nicht nur die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle ausbreitet feststellen, sondern auch die Wellenlänge  $\lambda$ , die Frequenz  $f$  und die Periodendauer  $T$  einer Schallwelle angeben.

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist der Abstand zweier Punkte gleicher Phasenlage in Metern, die Periodendauer  $T$  ist die Zeit in der eine Schwingung vollzogen wird in Sekunden und die Frequenz  $f$  ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde in Hertz.

Die Zusammenhänge sind wie folgt:<sup>9</sup>

$$\mathbf{1}^{10} \quad f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{1}{f} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

f.....Frequenz in Hz  
T....Periodendauer in s  
 $\lambda$ ...Wellenlänge in m  
c....Schallgeschwindigkeit

---

<sup>5</sup> Vgl. Cremer, 1978, S.3ff

<sup>6</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 134f

<sup>7</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 22f

<sup>8</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 21

<sup>9</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 3ff

<sup>10</sup> Vgl. ebd.

## 1.2 SCHALLDRUCK, SCHALLSCHNELLE UND SCHALLPEGEL

Bevor man sich mit raumakustischen Parametern auseinandersetzen kann, gilt es noch einige andere Größen des Schalls zu erwähnen.

### 1.2.1 SCHALLDRUCK UND SCHALLSCHNELLE

Der Schalldruck  $p$  wird in Pascal [Pa] oder in Newton pro Quadratmeter [N/m<sup>2</sup>] angegeben, wobei  $1\text{Pa} = 1\text{ N/m}^2$  gilt. Markante Werte des Schalldrucks sind  $20 \cdot 10^{-5}\text{ Pa}$  (=  $20\text{ }\mu\text{Pa}$ ), welcher die Hörschwelle markiert.  $0.1\text{ Pa}$  ist der Wert eines durchschnittlich lauten Tons und  $1.5 \cdot 10^2\text{ Pa}$  markiert die Schmerzgrenze.

Die Schallschnelle  $v$  ist wie oben erwähnt die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilchen, die durch ein Schallereignis angeregt werden, um ihre Ruhelage schwingen.

Druck und Schnelle werden bei Sinusschwingungen üblicherweise im Effektivwert, also Spitzenwert/ $\sqrt{2}$ , angegeben. Weiters verhalten sich Schalldruck und Schallschnelle im ebenen Schallfeld (Fernfeld) zueinander direkt proportional und zum Abstand einer Schallquelle umgekehrt proportional. Im Nahfeld verhält sich der Schalldruck wie im Fernfeld, wohingegen die Schallschnelle im Nahfeld erheblich mehr ansteigt, was den Nahbesprechungseffekt bei Druckgradientenempfängern zur Folge hat.<sup>11</sup>

Der Quotient aus Druck und Schnelle ist die Schallkennimpedanz  $Z_0$ .

$$2^{12} \quad \frac{p}{v} = Z_0$$

$p$ ...Schalldruck in Pa

$v$ ...Schallschnelle in m/s

$Z_0$ ...Schallkennimpedanz in Ns/m<sup>3</sup>

---

<sup>11</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S.7

<sup>12</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S.8



## 1.2.2 SCHALLPEGEL

Pegel gibt immer ein Verhältnis zwischen zwei Größen an. Sind das zwei unbestimmte Werte, so spricht man von relativem Pegel. Ist eine Größe aber festgelegt und somit ein Bezugspunkt, so spricht man von absolutem Pegel.

Der Schalldruckpegel ist ein absoluter Pegel, weil die Hörschwelle als Bezugspunkt festgelegt wurde.

$$6^{16} \quad L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$$

$L_p$ ...Schalldruckpegel in dB  
 $p$ ...Schalldruck in Pa  
 $p_0$ .. Bezugspunkt Hörschwelle  $20 \cdot 10^{-5}$  Pa

Weitere Pegel sind der Schalleistungspegel und der Schallintensitätspegel. Auch diese sind absolute Pegel mit festen Bezugswerten.

$$7^{17} \quad L_p = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0}$$

$L_p$ ...Schalleistungspegel in dB  
 $P$ ...Schalleistung in W  
 $P_0$ ...Bezugspunkt  $1 \text{ pW} = 10^{-12}$  W

$$8^{18} \quad L_I = 20 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

$L_I$ ...Schallintensitätspegel in dB  
 $I$ ...Schallintensität in  $\text{W/m}^2$   
 $I_0$ ...Bezugspunkt  $1 \text{ pW/m}^2$

---

<sup>16</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 29

<sup>17</sup> Vgl. ebd.

<sup>18</sup> Vgl. ebd.

## 2. REFLEXION, BEUGUNG, BRECHUNG UND ABSORPTION

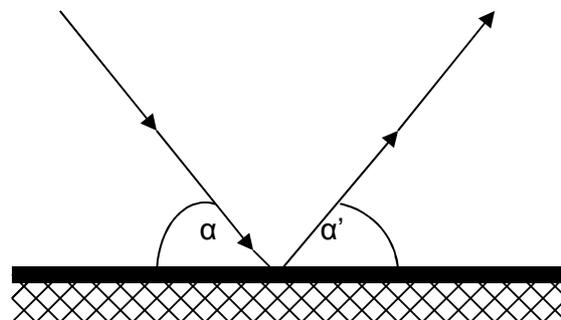
Ein freies Schallfeld existiert in der Natur nicht und ist in Annäherung nur in eigens für Messungen im Freifeld gebauten schalltoten Räumen zu erreichen. In der Natur stellen sich der gradlinigen Schallausbreitung immer Hindernisse in den Weg und es kommt zu Reflexionen, Beugungen und Absorptionen. In Räumen noch viel mehr, da diese durch Böden, Decken und Wände begrenzt sind und üblicherweise über Mobiliar verfügen.

### 2.1 REFLEXION

Der Einfachheit halber betrachtet man bei der Reflexion nur Schallstrahlen, deshalb lassen sich die Gesetze der Optik im Großen und Ganzen übernehmen.

#### 2.1.1 REFLEXION AN EBENEN FLÄCHEN

Bei Reflexionen an ebenen Flächen gilt wie in der Optik: Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel.<sup>19</sup>



**Abb. 1** Reflexion an einer ebenen Fläche: Der Einfallswinkel  $\alpha$  ist gleich dem Ausfallswinkel  $\alpha'$ .<sup>20</sup>

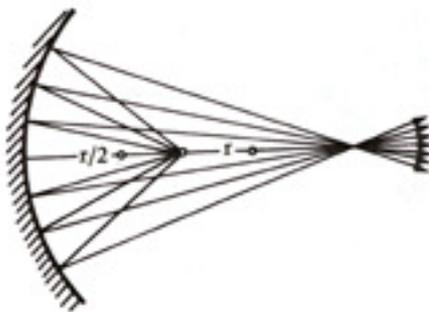
<sup>19</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 11

<sup>20</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 12, vom Autor modifiziert

## 2.1.2 REFLEXION AN GEKRÜMMTEN FLÄCHEN

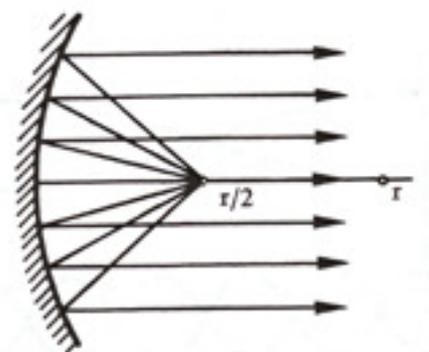
Auch bei Reflexionen an gekrümmten Flächen gelten die Gesetze der Optik.

Bei Reflexionen an konkaven Flächen hängt es davon ab, in welchem Abstand sich die Schallquelle zur gekrümmten Fläche befindet. Wenn der Abstand der Schallquelle größer ist als der halbe Radius, aber kleiner als der Radius selbst, wird der Schall in einem Brennpunkt außerhalb des Radius gesammelt und von dort zerstreut.



**Abb. 2** Reflexionen an konkaver Fläche,  
Abstand Schallquelle – reflektierende Fläche  
größer  $r/2$ .<sup>21</sup>

Ist der Abstand der Schallquelle zur konkaven Fläche gleich dem Krümmungsradius, so verlaufen die reflektierten Schallstrahlen parallel zueinander.

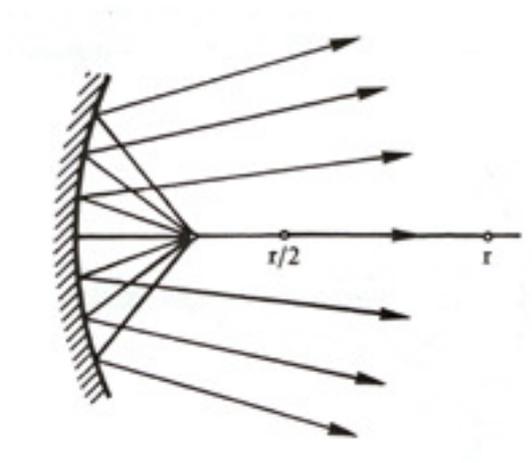


**Abb. 3** Reflexion an konkaver Fläche,  
Abstand Schallquelle – reflektierende Fläche  
gleich  $r/2$ .<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 13

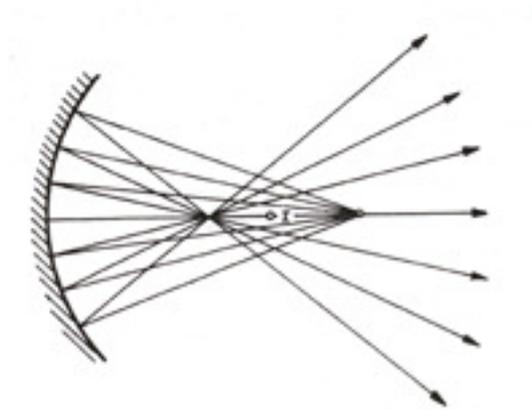
<sup>22</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 14

Wenn der Abstand der Schallquelle zur reflektierenden Fläche kleiner ist als der halbe Krümmungsradius, werden die Strahlen gestreut.



**Abb. 4** Schallreflexion an konkaver Fläche, Abstand Schallquelle – reflektierende Fläche kleiner als  $r/2$ .<sup>23</sup>

Genauso, wenn der Abstand der Schallquelle größer als der Krümmungsradius ist.



**Abb. 5** Schallreflexion an konkaver Fläche, Abstand Schallquelle – reflektierende Fläche größer  $r$ .<sup>24</sup>

An konvexen Flächen wird Schall immer gestreut.

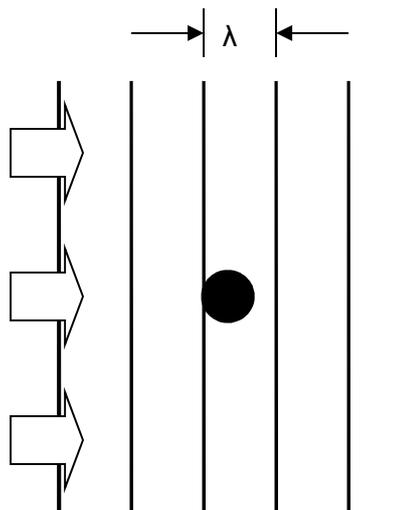
<sup>23</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 14

<sup>24</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 15

Diese Bündelungs- und Streuungseffekte treten oft in Kirchen und anderen alten Gebäuden mit Kuppel oder großen Bögen auf und können unter Umständen zu ungewünschter Hervorhebung einzelner Schallquellen führen.

## 2.2 BEUGUNG

Schallbeugung passiert dann, wenn ein Hindernis nicht groß genug ist um Schall zu reflektieren. Maßgeblich ist hier das Verhältnis zwischen der Größe der reflektierenden Fläche und der Wellenlänge gemeint. Ist das Hindernis klein im Verhältnis zur Wellenlänge, so wird der Schall vollständig herumgebeugt.

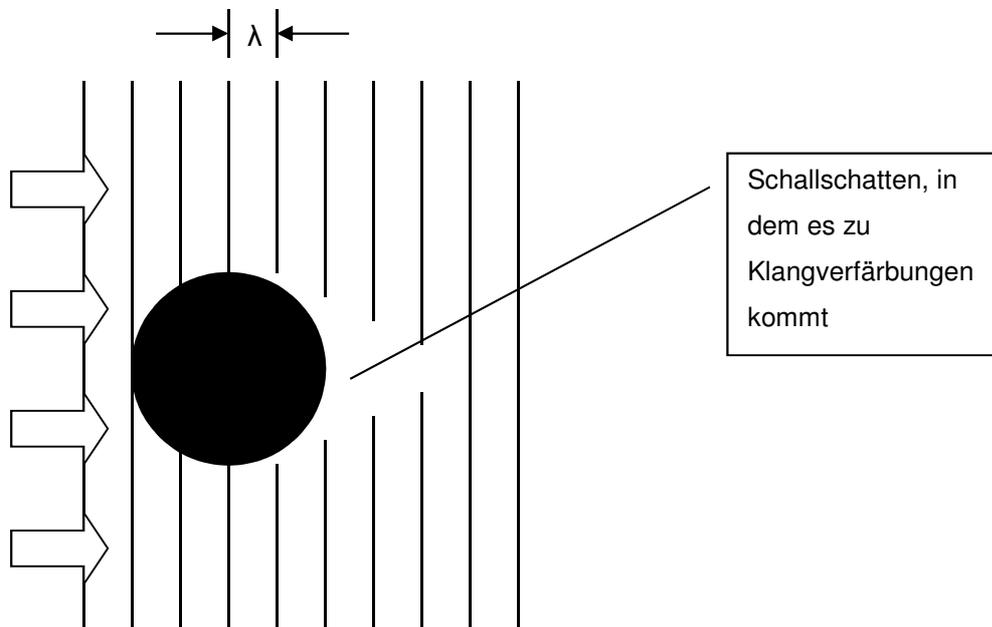


**Abb. 6** Schallbeugung um ein Hindernis: Das Objekt ist klein im Verhältnis zur Wellenlänge<sup>25</sup>

Je größer das Hindernis im Vergleich zur Wellenlänge wird, desto eher wird reflektiert, wobei selbst bei einem Verhältnis von 5:1 zwischen Hindernis und Wellenlänge noch nicht total reflektiert wird, sondern immer noch ein Teil um das Hindernis herumgebeugt

<sup>25</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 16, vom Autor modifiziert

wird. Allerdings entsteht dabei schon ein beträchtlicher Schallschatten, in dem es zu Klangverfärbungen kommt.



**Abb. 7** Schallbeugung um ein Hindernis: Das Objekt ist groß im Vergleich zur Wellenlänge und wirft einen Schallschatten<sup>26</sup>

Entscheidend für die totale Reflexion ist neben der Größe der reflektierenden Fläche, der Abstand der Schallquelle zum Hindernis, der Abstand zum Hörer und der Winkel, in dem die Wellenfront auf die Fläche auftrifft. Desto geringer der Abstand von Schallquelle und Hörer, und desto spitzer der Winkel zu  $90^\circ$  senkrecht zur Fläche ist, desto tiefer ist die reflektierte untere Grenzfrequenz.

<sup>26</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 16, vom Autor modifiziert

$$9^{27} \quad f_{UG} = \frac{2 \cdot c}{(d \cdot \cos \alpha)^2} \cdot \frac{a_1 + a_2}{a_1 \cdot a_2}$$

$f_{UG}$ ...tiefste noch zu reflektierende

Frequenz in Hz

$c$ ...Schallgeschwindigkeit in m/s

$d$ ...Durchmesser des Reflektors in m

$\alpha$ ...Einfallswinkel in °

$a_1$ ...Entfernung des Reflektors in m

$a_2$ ...Entfernung des Hörers in m

## 2.3 BRECHUNG

Schallbrechung passiert beim Übergang in ein anderes Medium mit anderer Schallgeschwindigkeit. Sie ist bei der Konstruktion und Berechnung von Absorbern in der Raumakustik von Bedeutung. In der Natur tritt sie beim Übergang von Schall in andere Luftschichten auf, weil die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist. Liegt also eine kühlere Luftschicht auf einer wärmeren, so wird der Schall von der Erde weggebeugt. Bei einer Inversionswetterlage, also wenn eine wärmere Luftschicht auf einer kälteren liegt, wird der Schall zur Erde hingebogen. Dadurch, dass der Schall auf dem gekrümmten Weg einen Hörer gleich schnell erreichen kann, wie der sich auf geradem Weg ausbreitende Direktschall, erscheinen die Ausbreitungsbedingungen in diesem Fall verbessert.<sup>28</sup>

## 2.4 ABSORPTION

Schallabsorption bedeutet, dass dem Schall Energie entzogen wird indem ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird. Als Maß für die Absorption dient der Absorptionsgrad  $\alpha$ .<sup>29</sup> Dieser kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 für totale

---

<sup>27</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 16

<sup>28</sup> Vgl. Cremer, 1948, S. 12f

<sup>29</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 36

Reflexion und 1 für totale Absorption steht.<sup>30</sup> Der Absorptionsgrad gibt das Verhältnis zwischen eintreffender Schallenergie und absorbiertes Energie an. Im Gegenzug dazu gibt es auch den Reflexionskoeffizienten  $r$ , welcher das Verhältnis zwischen der Amplitude der reflektierten Schallwelle und der Amplitude der einfallenden Schallwelle darstellt.<sup>31</sup> Ermittelt werden kann der Absorptionsgrad mittels verschiedener Messverfahren, die Cremer beschreibt.<sup>32</sup>

Es ist allerdings falsch anzunehmen, dass Schall nur in eigens dafür geschaffenen raumakustischen Elementen an Energie verliert. Auch an der Luft erfährt der Schall einen Energieverlust, der durch den Luftabsorptionskoeffizienten  $m$  ausgedrückt wird.<sup>33</sup> Relevant wird die Absorption durch Luft erst ab Frequenzen über 2 kHz und nimmt mit steigender Frequenz zu, wodurch Nachhallzeiten sehr großer Räume bei hohen Frequenzen meist nur dadurch bestimmt werden. Außerdem steigt bei Frequenzen über 4 kHz die Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit.<sup>34</sup>

	$m$ in $10^{-3}$ Neper je Meter, für Oktavbänder mit Mittenfrequenz in Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10 °C, 30 % bis 50 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10 °C, 50 % bis 70 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10 °C, 70 % bis 90 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20 °C, 30 % bis 50 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20 °C, 50 % bis 70 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20 °C, 70 % bis 90 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

ANMERKUNG Diese Werte werden aus den Tabellen in ISO 9613-1 mit dem Schalldämpfungskoeffizient der atmosphärischen Absorption in Dezibel je Kilometer für Terzbänder abgeleitet, indem die Werte in diesen Tabellen durch 4,343 (=  $10 \lg e$ ) dividiert werden. Die Werte für die Oktavbänder sind die für das mittlere Terzband unter 1 kHz und die für das untere Terzband über 1 kHz. Die Werte werden linear über die Luftfeuchte im angegebenen Bereich gemittelt.

**Abb. 8** Schalleistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft  $m$ , in Oktavbändern, in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte<sup>35</sup>

<sup>30</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 36

<sup>31</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 63

<sup>32</sup> Vgl. Cremer, 1948, S. 155ff

<sup>33</sup> Vgl. Barron, 2010, S. 33

<sup>34</sup> Vgl. ebd.

<sup>35</sup> DIN EN 12354 – 6 (06.2003) Tab.1, S. 8

Um die Gesamtaborption einer Wand zu ermitteln, berechnet man das Absorptionsvermögen, das das Produkt des Absorptionsgrads und der absorbierenden Fläche darstellt.

$$10^{36} \quad A = \alpha \cdot S$$

A...Absorptionsvermögen in m<sup>2</sup>

$\alpha$ ...Absorptionsgrad

S...absorbierende Fläche in m<sup>2</sup>

Absorber sind immer frequenzabhängig, was auf ihrer Bauform und das verwendete Material zurückzuführen ist.

Die wichtigsten Funktionsprinzipien von Absorbern sind die Reibung durch Luftbewegung und das Anregen von Platten zum Mitschwingen.

Nahezu alle Schallabsorber enthalten offenporiges oder poröses Material. Durch die Reibung von in Schwingung versetzten Luftteilchen in offenporigen Materialien wie Faserstoffen wird ein Teil der Schallenergie in Wärme umgewandelt. Diese Art der Absorption ist bei höheren Frequenzen in einem relativ breiten Frequenzbereich wirksam.<sup>37</sup>

Die Absorption durch Anregen von Platten zum Mitschwingen funktioniert, indem Platten, die federnd gelagert sind mit den Schallwellen mitschwingen und dem Schall so Energie entzogen wird. Auch diese Plattenschwinger absorbieren in einem schmalen Frequenzbereich, können aber durch die Kombination mit zum Beispiel porösen Absorbern breitbandig gestaltet werden.<sup>38</sup>

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten Helmholtzresonatoren. In ihnen wird durch Resonanz die Luftbewegung und somit auch die Absorption verstärkt. Nachteil ist, dass Helmholtzresonatoren dadurch nur in einem relativ schmalen Band um die Resonanzfrequenz absorbieren.<sup>39</sup>

---

<sup>36</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 18

<sup>37</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 177

<sup>38</sup> Vgl. Cremer, 1948, S. 159

<sup>39</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S.171ff

### 2.4.1 HÖHENABSORBER

Höhenabsorber sind meist poröse Absorber, das heißt Vorhänge, Teppiche, Faserstoffe, in deren Poren die Schallenergie durch die Reibung am Material Energie verliert, die in Wärme umgewandelt wird.<sup>40</sup>

Entscheidend für den Absorptionsgrad poröser Materialien ist der längenbezogene Strömungswiderstand. Desto enger die Kanäle sind, in die der Schall eindringt, desto größer ist der spezifische Strömungswiderstand und desto mehr Energie wird dem Schall entzogen. Wird der spezifische Strömungswiderstand aber zu groß, dringt der Schall nicht mehr in die poröse Schicht ein und wird weitgehend reflektiert.<sup>41</sup>

Die Absorption steigt mit steigender Energie, deshalb ist ein Absorber bei einem Schallschnelleximum am wirksamsten. Da an der reflektierenden Wand, vor der ein Absorber meist befestigt ist aber ein Schnellenullpunkt vorherrscht, ist es sinnvoll einen Absorber in einem gewissen Abstand, mit Hilfe eines Lattenunterbaus, zur Wand anzubringen. In einem Abstand von  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge der reflektierten Welle zur reflektierenden Wand herrscht jedoch ein Schnelleximum vor, weshalb die untere Grenzfrequenz des Absorbers nach unten verschoben werden kann, in Abhängigkeit der Materialdicke des Absorbers und dessen Abstand zur reflektierenden Wand.<sup>42</sup>

Diese Höhenabsorber sind oft aus optischen Gründen verkleidet mit Platten aus Holz, oder ähnlichem. Diese haben dann viele Eintrittsöffnungen durch die der Schall in die Tiefen des Materials vordringen kann. Diese Verkleidungen senken zusätzlich die untere Grenzfrequenz des Absorbers, bedämpfen seine Wirkung im oberen Frequenzbereich aber ein wenig.<sup>43</sup>

---

<sup>40</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 278

<sup>41</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 71f

<sup>42</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 66ff

<sup>43</sup> Vgl. Fasold, 2003, S. 75

### 2.4.2 MITTENABSORBER

Wie vorhin erwähnt, werden Höhenabsorber durch konstruktive Maßnahmen auch im mittleren Frequenzbereich um 500 Hz wirksam. Hauptsächlich wird das durch eine dickere Absorptionsschicht und einen größeren Wandabstand erreicht.<sup>44</sup>

An dieser Stelle sei auch der Helmholtzresonator erwähnt. Es handelt sich dabei um ein Luftvolumen mit einer kleinen Öffnung nach außen. Durch die träge Masse der sich in der Öffnung befindenden Luft entsteht ein Masse-Feder System mit einer gewissen Eigenresonanz.<sup>45</sup>

Helmholtzresonatoren arbeiten nur in einem sehr schmalen Band um die Resonanzfrequenz, obwohl durch Auskleiden des Hohlraums mit Faserstoffen die Absorption breitbandiger gemacht werden kann.<sup>46</sup>

### 2.4.3 TIEFENABSORBER

Tiefenabsorber sind meist Plattenabsorber, die auch nach dem Masse-Feder Prinzip arbeiten. Die Platte wird zum Schwingen angeregt und leitet diese Schwingung in einen Hohlraum weiter, der mit Faserstoffen gefüllt ist. So wird dem Schall durch die Schwingung der Platte und durch deren innere Reibung sowie durch die Reibung der Luft in den Faserstoffen, Energie entzogen.<sup>47</sup>

Tiefenabsorber sind wie Mittenabsorber auch Resonanzsysteme. Die Resonanzfrequenz hängt vom Volumen des Absorbers, der Flächenmasse der schwingenden Platte, der Aufhängung und der Steifigkeit ab. Die Resonanzfrequenz sinkt mit steigender Flächenmasse, steigendem Volumen und größerem Abstand zur Wand.<sup>48</sup>

---

<sup>44</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 295ff

<sup>45</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 73f

<sup>46</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 169

<sup>47</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 72f

<sup>48</sup> Vgl. ebd.

Es können natürlich auch Helmholtzresonatoren bei entsprechender Baugröße als Tiefenabsorber verwendet werden.<sup>49</sup>

#### *2.4.4 PUBLIKUMSABSORPTION*

Auch Menschen beziehungsweise Publikum wirken absorbierend. Die Absorption setzt bei ca. 250 Hz ein und erreicht bei höheren Frequenzen Werte, die mit porösen Absorbern vergleichbar sind. Kath hat 1966 den Einfluss der Bekleidung untersucht und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass bei hohen Frequenzen stehendes Publikum etwa 22% mehr Absorptionsfläche aufweist als sitzendes Publikum. Weiters kam er zu dem Schluss, dass in Konzertsälen oder Theatern die gepolsterte Bestuhlung witterungsbedingte Unterschiede in der Bekleidung mildert, hingegen in Kirchen die Nachhallzeit durch die witterungsbedingt unterschiedliche Bekleidung bei konstanter Besucherzahl stark variieren kann.<sup>50</sup>

---

<sup>49</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 74

<sup>50</sup> Vgl. Kath, 1966, S. 234ff

## 3. RAUMAKUSTIK

Die Raumakustik befasst sich mit den akustischen Gegebenheiten in Räumen. Nachdem sich der Großteil unseres Lebens in geschlossenen Räumen abspielt, stellt sich natürlich die Frage, wie ein Raum die Übertragung von Sprache, Musik und Geräuschen beeinflusst. Das gilt insbesondere für Räume, die einen bestimmten „akustischen“ Zweck erfüllen, wie Hörsäle, Auditorien, Konzerthäuser, Opernhäuser, Theatern und natürlich Regieräume und Aufnahmeräume.<sup>51</sup> Weil die Sprachverständlichkeit andere akustische Voraussetzungen braucht als Musik sind diese Räume unterschiedlich gestaltet. Entscheidend ist in diesem Fall unter anderem die Nachhallzeit.<sup>52</sup>

### 3.1 RAUMAKUSTISCHE PARAMETER

#### 3.1.1 HALL

In den Kapiteln eins und zwei ging es um die Ausbreitung von Schall. Hier soll nun der zeitliche Aufbau des Schallfeldes besprochen werden.

Findet in einem Raum ein Schallereignis statt, das nach allen Seiten hin abstrahlt, so wird der Schall an den Wänden, der Decke und dem Boden reflektiert und absorbiert, am Mobiliar gebeugt oder gestreut. Dadurch treffen beim Hörer nach dem Direktschall die ersten Reflexionen ein. Die nachfolgenden Reflexionen überlagern sich und bilden den Nachhall. Die ersten Reflexionen sind ausschlaggebend für den Raumeindruck, das heißt wie groß ein Raum ist und wie er gestaltet ist.<sup>53</sup>

Der gesamte reflektierte Schall bildet das so genannte diffuse Schallfeld, das sich im Idealfall auf den ganzen Raum gleichmäßig verteilt. Diese Gleichmäßigkeit tritt eher auf, wenn ein Raum viele streuende Elemente aufweist, wie Säulen oder Diffusoren und die

---

<sup>51</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 1ff

<sup>52</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 92

<sup>53</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 255

Wände und Decken nicht glatt sondern strukturiert sind.<sup>54</sup> Das diffuse Schallfeld bildet sich umso schneller, je kleiner der Raum ist, das heißt, je öfter pro Zeiteinheit von den Wänden, der Decke und dem Boden und natürlich von anderen Gegenständen, die im Verhältnis zur Wellenlänge groß sind, der Schall reflektiert wird.<sup>55</sup>

So ein diffuses Schallfeld kann sich nur bei breitbandigen impulshaltigen Signalen wie Sprache, Musik oder Rauschen bilden. Bei Sinustönen entstehen selbst in Räumen deren Begrenzungsflächen zueinander akustisch nicht parallel sind und strukturiert sind, stehende Wellen, deren Druckmaxima und Druckminima leicht zu lokalisieren sind. Stehende Wellen treten häufiger in kleinen, rechteckigen Räumen (Wohnzimmer) bei tiefen Frequenzen auf.<sup>56</sup>

### **3.1.1.1 Nachhall**

Der Nachhall ist sicher die wichtigste Erscheinungsform des Halls. Dem Hörer erscheint er als Ausklingen einer Schallquelle. Je länger der Nachhall dauert umso besser verteilt sich die Schallenergie im Raum.<sup>57</sup> Der Nachhall ist umso kürzer, die Schallenergie nimmt umso schneller ab, je kleiner der Raum ist, das heißt je öfter der Schall reflektiert wird und je größer die Absorption der Begrenzungsflächen ist.<sup>58</sup>

Die Nachhallzeit  $T$  ist nach W.C. Sabine (1868 – 1919) die Zeit, in der nach dem Abschalten einer Schallquelle die Schallenergie auf ihren millionsten Teil abfällt. Das entspricht einem Rückgang des Schalldruckpegels um 60 dB. Für die Berechnung der Nachhallzeit wird oft die so genannte „Sabinesche Nachhallformel“ verwendet. Sie gilt vor allem für lange Nachhallzeiten, demnach steigt die Nachhallzeit mit zunehmendem Raumvolumen und nimmt mit zunehmender Absorption ab.<sup>59</sup>

---

<sup>54</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 258f

<sup>55</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 261

<sup>56</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 67ff

<sup>57</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 146f

<sup>58</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 136

<sup>59</sup> Vgl. Sabine, 1922, S. 42

$$11^{60} \quad T = 0,163 \frac{V}{A}$$

T...Nachhallzeit in s

V...Raumvolumen in m<sup>3</sup>

A...Absorptionsvermögen in m<sup>2</sup>

Da bei vollständiger Absorption die Nachhallzeit nicht 0 wird, hat Eyring eine genauere Nachhallformel abgeleitet, die diesem Widerspruch Rechnung trägt und vor allem Räumen mit niedriger Nachhallzeit genauere Werte liefert.<sup>61</sup>

Dabei wird das Absorptionsvermögen A der Sabineschen Formel ersetzt durch

$$12^{62} \quad A = -S \cdot \ln(1 - \alpha_m)$$

A...Absorptionsvermögen in m<sup>2</sup>

S...Gesamtoberfläche des Raumes in m<sup>2</sup>

$\alpha_m$  ... mittlerer Absorptionsgrad

Einen genaueren Wert, vor allem für große Räume, erhält man, wenn die Absorption durch Luft in der Sabineschen Nachhallformel auch berücksichtigt wird.

$$13^{63} \quad T = 0,163 \cdot \frac{V}{4mV - S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

T...Nachhallzeit in s

V...Volumen des Raumes in m<sup>3</sup>

m...Luftdämpfungskonstante

S...Gesamtoberfläche des Raumes in m<sup>2</sup>

$\bar{\alpha}$ ...mittlerer Absorptionsgrad

---

<sup>60</sup> Vgl. Sabine, 1922, S. 43ff

<sup>61</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 140

<sup>62</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 32

<sup>63</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 264

Die Nachhallzeit stimmt selten mit der subjektiv wahrgenommenen Nachhalldauer überein, da die in einem Raum verfügbare Dynamik es gar nicht zulässt, einen so großen Schalldruckpegel zu hören. So ist die Nachhalldauer jene Zeitspanne, in der nach Abschalten einer Schallquelle ein Ausklingen hörbar ist. Sie ist damit abhängig von der Lautstärke der Schallquelle, Störgeräuschen im Raum und der Hörschwelle des Beobachters.<sup>64</sup> Deshalb ändert sich der hörbare Raumanteil mit der Lautstärke der Schallquelle, bei lauten Stellen nimmt die Nachhalldauer stark zu, wohingegen bei leisen Stellen kaum Raumanteil auszumachen ist.<sup>65</sup>

Die von der Mehrheit des Publikums als optimal angegebene Nachhallzeit hängt von vielen Faktoren ab. Neben der Art der Darbietung, dem Musikstil, der Interpretation des Musikers, hängt sie auch von der Raumgröße, der Verteilung und der Stärke der ersten Reflexionen sowie vom Frequenzgang des Nachhalls ab. Auf Grund dieser vielen Parameter ist es beinahe unmöglich, die optimale Nachhallzeit in einem Raum zu erreichen, außerdem muss heutzutage ein Raum meist vielfältig nutzbar sein, also werden nur Richtwerte für die Nachhallzeit angegeben.<sup>66</sup>

In Räumen für Sprachdarbietungen steht die Sprachverständlichkeit, die kürzere Nachhallzeiten verlangt, im Vordergrund. Die kürzesten Nachhallzeiten findet man also in Sprecherstudios. Für Musik werden längere Nachhallzeiten als angenehm empfunden. Die Nachhallzeiten von Opernhäusern sind im Vergleich zu Konzertsälen etwas kürzer, um die Sprachverständlichkeit zu erhalten. Die längsten Nachhallzeiten finden sich in Kirchen.<sup>67</sup>

---

<sup>64</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 233ff

<sup>65</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 233

<sup>66</sup> Vgl. Bruckmayer, 1962, S. 525ff

<sup>67</sup> Vgl. Evedrest, 2001, S. 150ff

Art des Raums	Optimale Nachhallzeit in s
Sprecherstudio	0,3
Hörspielstudio	0,6
großes Fernsehstudio	0,8
Saal für Sprachdarbietungen (Vortragssaal, Theater)	0,7 – 1,2
Opernhaus	1,5
Konzertsaal, großes Studio für Musikaufnahmen	2,0
Kirchen	2,5 – 3,0

**Abb. 9** Tabelle verschiedener optimaler Nachhallzeiten für unterschiedliche Räume und Säle<sup>68</sup>

Die Qualität des Nachhalls und des Klangs eines Raums ist immer frequenzabhängig. Diese Frequenzabhängigkeit tritt in jedem Raum auf, frequenzunabhängigen Nachhall können nur Hallgeräte erzeugen, weshalb dieser oft unnatürlich klingt. Die Frequenzabhängigkeit des Nachhalls ergibt sich aus der Frequenzabhängigkeit der akustischen Gestaltungsmittel wie Absorber und Reflektoren und führt zu einer Klangfärbung des Nachhalls, der, sofern die Schallquelle entsprechend laut genug ist, die ganze Darbietung färbt.<sup>69</sup>

So haben Räume mit großen glatten Steinwänden den längsten Nachhall im tieffrequenten Bereich, was einen eher dumpfen Klang zur Folge hat. Längere Nachhallzeiten im mittleren Frequenzbereich haben einen warmen Klang zur Folge, was in Konzertsälen bevorzugt wird und durch Holzvertäfelungen und ähnlichem erreicht wird. In Aufnahmeräumen versucht man die Frequenzabhängigkeit eher gering zu halten, in allen Räumen ist aber ein Abfall der hohen Frequenzen zu beobachten, was auf die Luftabsorption zurück zu führen ist.<sup>70</sup> Deshalb ist der Nachhallzeit eine physikalische Grenze gesetzt und kann bei 10 kHz 1,2 s nie überschreiten.<sup>71</sup> Dieser Tatsache wird in der Formel Nummer 13 durch das Glied  $4mV$  Rechnung getragen, welches aber durch die

<sup>68</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 35

<sup>69</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 255

<sup>70</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 35

<sup>71</sup> Vgl. Akustische Informationen des IRT, 1968, S. 2ff

Abhängigkeit vom Volumen des Raumes erst bei großen Räumen Auswirkungen auf vor allem höhere Frequenzen zeigt (siehe Abb. 8).

### 3.1.2 HALLRADIUS

Als Hallradius bezeichnet man den Abstand von der Schallquelle, an dem die Schallpegel des Direktschalls und des Diffusschalls gleich groß sind. In sehr geringer Entfernung zu einer Schallquelle ist das weniger von Bedeutung, auch in sehr halligen Räumen, da das Direktfeld das Diffusfeld dominiert.<sup>72</sup> Da der Schallpegel des Direktschalls einer kugelförmig abstrahlenden Schallquelle mit der doppelten Entfernung um 6 dB abnimmt, wohingegen der Schallpegel des Diffusfeldes bei längeren Nachhallzeiten im ganzen Raum gleich bleibt überlagern sich die beiden Schallfelder und an einem bestimmten Punkt, mit der Entfernung  $r_H$  zur Schallquelle, dem Hallradius, haben Direkt- und Diffusfeld den gleichen Schallpegel.<sup>73</sup>

Innerhalb des Hallradius überwiegt der Direktschall mit seiner Richtungsinformation, außerhalb des Hallradius dominiert das diffuse Schallfeld den Gesamtschall. Am Hallradius selbst ist der Schallpegel um genau 3 dB höher als jener der beiden einzelnen Schallpegel.<sup>74</sup>

Der Hallradius hängt vom Raumvolumen und von der Nachhallzeit ab. Er steigt mit steigendem Raumvolumen, nimmt aber mit zunehmender Nachhallzeit ab.

$$14^{75} \quad r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

$r_H$ ...Hallradius in m

V...Raumvolumen in m<sup>3</sup>

T...Nachhallzeit in s

---

<sup>72</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 262

<sup>73</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 183

<sup>74</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 36

<sup>75</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 183

Aus dieser Formel errechnen sich erstaunlich geringe Hallradien selbst für sehr große Räume. Da der Hallradius für kugelförmige Abstrahlung definiert ist, welcher so nur sehr selten auftritt, der Mund eines Sprechers oder ein Lautsprecher mit steigender Frequenz eine immer stärkere Richtwirkung haben und der Hallradius dadurch frequenzabhängig vergrößert wird, wird in folgender Formel für den „Effektiven Hallradius“ der Bündelungsgrad einer Schallquelle miteinberechnet.<sup>76</sup>

$$15^{77} \quad r_{H_{eff}} = 0,057 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{V}{T}}$$

$r_{H_{eff}}$  ...effektiver Hallradius in m

$\gamma$ ...Bündelungsgrad der Schallquelle

V...Raumvolumen in m<sup>3</sup>

T...Nachhallzeit in s

Der Bündelungsgrad  $\gamma$  ist bei frequenzabhängig. Deshalb steigt der Korrekturfaktor  $\sqrt{\gamma}$  bei 10 kHz auf Werte um 5, das bedeutet der Hallradius steigt um das Fünffache. Wenn Schall gerichtet empfangen wird, steigt der Hallradius ebenfalls. So vergrößert er sich bei achtförmiger und nierenförmiger Richtcharakteristik eines Mikrofons um den Faktor 1,7, bei Supernieren um den Faktor 1,9, bei Hypernieren um den Faktor 2 und bei Richtrohren sogar um den Faktor 1,7-3,3.<sup>78</sup>

Bei der Aufnahme multiplizieren sich die Korrekturfaktoren von Schallabstrahlung und Schallempfang. So liegt der praktische Hallradius von Nierenmikrofonen um den Faktor 2 bis 5 höher als der in der Formel für  $r_H$  errechnete Wert.<sup>79</sup>

---

<sup>76</sup> Vgl. Cremer, 1978, S. 241

<sup>77</sup> Vgl. ebd.

<sup>78</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 38

<sup>79</sup> Vgl. ebd.

### 3.1.3 IMPULSANTWORT

Mit Hilfe einer Impulsantwort eines Raumes lässt sich die zeitliche Abfolge von Reflexionen an einer Hörposition ermitteln. Die Impulsantwort setzt sich aus dem Direktsignal, den weiter oben genannten ersten Reflexionen und dem Nachhall zusammen. Der Nachhall ist in Wahrheit nichts anderes als Reflexionen, die nach den ersten Reflexionen eintreffen. Da das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Ohres aber beschränkt ist, nehmen wir die Impulsantwort als Ganzes als gleichmäßig verklingendes Rauschen wahr. Durch die Feinstruktur einer Impulsantwort lassen sich im Gegensatz zur reinen Betrachtung des Nachhalls Rückschlüsse auf die Qualität der Schallübertragung in dem jeweiligen Raum ziehen, weshalb die Impulsantwort eines Raumes auch als ihr „akustischer Fingerabdruck“ gesehen werden kann, da die Impulsantwort jedes Raumes einzigartig ist.<sup>80</sup>

Reflexionen, die bis etwa 50 ms nach dem Direktschall eintreffen, werden auch als „nützliche Reflexionen“ bezeichnet, da sie scheinbar die Lautstärke des Direktsignals erhöhen, weil das menschliche Ohr sie nicht getrennt wahrnehmen kann.<sup>81</sup> Reflexionen, die später als 100 ms eintreffen, werden als Echo wahrgenommen.<sup>82</sup>

Aus der Impulsantwort beziehungsweise aus der Anzahl der „nützlichen Reflexionen“ lassen sich verschiedene Maßzahlen ableiten, wie die Deutlichkeit und das Klarheitsmaß.

Wenn man die Schallenergie der „nützlichen Reflexionen“ zur gesamten eintreffenden Schallenergie in Verhältnis bringt, so erhält man die Deutlichkeit in Prozent. Hohe Deutlichkeit bedeutet in diesem Zusammenhang hohe Sprachverständlichkeit, lässt Musik aber trocken wirken.<sup>83</sup>

Das Klarheitsmaß nach Reichardt definiert als zehnfacher Logarithmus das Verhältnis der bis 50 ms (Sprachklarheitsmaß, Deutlichkeitsmaß) beziehungsweise 80 ms (Musikklarheitsmaß, Durchsichtigkeitsmaß) eintreffenden, zur gesamten danach

---

<sup>80</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 255

<sup>81</sup> Vgl. Furrer, 1956, S. 85

<sup>82</sup> Vgl. Barron, 2010, S. 18

<sup>83</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 150

eintreffenden Schallenergie. Erhält man positive Werte, so ist die Deutlichkeit von Sprache bzw. die Durchsichtigkeit der Musik ausreichend.<sup>84</sup>

Als Durchsichtigkeit bezeichnet man bei Musik die Unterscheidbarkeit aufeinander folgender Töne bzw. die Unterscheidbarkeit gleichzeitig spielender Instrumente und deren unterschiedliche Tonhöhenbereiche. Sie bezeichnet also die Verständlichkeit von Musik, ähnlich der Wortverständlichkeit bei Sprache. Reflexionen bis 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls erhöhen die Durchsichtigkeit, spätere Reflexionen erhöhen die Halligkeit und mindern die Durchsichtigkeit.<sup>85</sup> Für Sprache ist die Grenze der „nützlichen Reflexionen“ auf 50 ms zu setzen (siehe oben).

## 3.2 RAUMAKUSTIK FÜR SPRACHE UND MUSIK

### 3.2.1 RAUMAKUSTIK FÜR MUSIK

Anderes gilt bei Räumen für musikalische Darbietungen: Hier ist es nicht so wichtig jedes einzelne Geräusch zu „verstehen“, ja hier ist „Verwischung“ sogar erwünscht. So sollten die Bogengeräusche der Streicher, Luft- und Klappengeräusche der Bläser oder Ungenauigkeiten im Zusammenspiel oder der Intonation von der „Einheit“ der Musik verdeckt werden.<sup>86</sup> Der typische Klang eines Orchesters lebt von der Durchmischung der einzelnen Instrumentengruppen, der Überlagerung ihrer Schalle und der, bis zu einem gewissen Grad, Verschmelzung aufeinander folgender Töne. Das wird durch Nachhallzeiten von etwa 1,5 bis 2 Sekunden erreicht. Der Klang eines Orchesters wird oft noch angenehmer empfunden, wenn der Nachhall in den unteren und mittleren Frequenzbereichen etwas länger ist, da das der Musik Wärme verleiht.<sup>87</sup>

Die oben erwähnte Lenkung der ersten Reflexionen darf allerdings nicht zu weit getrieben werden. Würde man den gesamten Schall, den die Musiker erzeugen, zum stark absorbierenden Publikum lenken, so würde der Nachhall des Raumes nicht genug angeregt werden, so dass, obwohl die Nachhallzeit lang genug wäre, kaum Nachhall zu

---

<sup>84</sup> Vgl. Reichardt, 1979, S. 71

<sup>85</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 151

<sup>86</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 270f

<sup>87</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 271

hören wäre. Außerdem sollten die Wände und die Decke der Bühne oder ähnlichem einen Anteil des Schalls zu den Musikern zurückwerfen, damit diese sich gegenseitig hören.<sup>88</sup>

Neben der ausreichend langen Nachhallzeit und einem angenehmen Frequenzgang des Nachhalls erwartet sich der Hörer in einem Konzertsaal, dass er vom Klang der Musik in gewisser Weise eingehüllt wird, so dass ein räumlicher Eindruck der Musik entsteht. Es hat sich gezeigt, dass für dieses Empfinden die Reflexionen der Seitenwände verantwortlich sind. Durch die Beugung der Schallwelle um den Kopf herum entstehen Klangunterschiede, die bei einer einzelnen Wellenfront für die Ortung des Ursprungs derselben herangezogen werden, bei der Komplexität der Schallfelder in einem Konzertsaal aber einen räumlichen Eindruck entstehen lassen.<sup>89</sup>

Bei Opernhäusern geht man, was die Nachhallzeit angeht, einen Kompromiss zwischen der optimalen Nachhallzeit für ein Orchesterkonzert und der Sprachverständlichkeit ein und setzt sie bei etwa 1,5 Sekunden an. So bleibt die Sprachverständlichkeit erhalten und der Nachhall bleibt lang genug für das Orchester. Ältere Opernhäuser haben eher kürzere Nachhallzeiten, wohingegen bei modernen Häusern die Nachhallzeit der eines Konzertsaals ziemlich nahe kommt. Vielleicht legt der Opernliebhaber heutzutage mehr Wert auf klangvolle Arien und schönen, ausgewogenen Orchesterklang, als auf die Sprachverständlichkeit.<sup>90</sup> Eine weitere Erklärung wäre, dass Opernhäuser im 20. Jahrhundert größer gebaut wurden als im 19. Jahrhundert.<sup>91</sup>

### *3.2.2 RAUMAKUSTIK FÜR SPRACHE*

Was macht die gute oder weniger gute Akustik von Räumen aus? Kann man den akustisch perfekten Raum planen, bauen? Als erstes gilt es einige Grundvoraussetzungen zu erfüllen, wie zum Beispiel den Störgeräuschpegel so gering wie möglich zu halten. Dazu zählen das Raumeigengeräusch sowie Klimaanlage, Lüftungen und Störgeräusche von außen. Es dürfen weiters keine Echos auftreten und der Schall sollte sich im Raum möglichst gleichmäßig verteilen, so dass an allen Plätzen genügend Lautstärke herrscht. Das heißt, man muss „ökonomisch“ mit der Schallenergie umgehen und sie durch richtige Gestaltung der Wände und Decken dorthin lenken, wo sie gebraucht wird, nämlich bei

---

<sup>88</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 271

<sup>89</sup> Vgl. ebd.

<sup>90</sup> Vgl. Beranek, 2004, S. 23

<sup>91</sup> Vgl. Friesecke, 2007, S. 100 Abb. 1.7-1

den Zuhörern. So sollten Wände und Decken, die maßgeblich an der Verteilung der ersten Reflexionen beteiligt sind oder sein könnten, reflektierend gestaltet sein und diese zu den Hörern lenken. Weiters muss der Raum eine seinem Verwendungszweck angepasste Nachhallzeit haben, welche es durch diese und ähnliche Maßnahmen zu erreichen gilt.<sup>92</sup>

Wird der Raum ausschließlich für Sprachdarbietungen, also Unterricht, Vorträge, Theater, genutzt, so sollte seine Nachhallzeit kurz sein. Eine zu lange Nachhallzeit würde ein Verschimmen der einzelnen Silben zur Folge haben, was die Sprachverständlichkeit verringert. Einen Kompromiss stellen hier Nachhallzeiten von 0,5 und 1,3 Sekunden dar, wobei der größere Wert für größere Räume gilt, in der man eine längere Nachhallzeit einfach unbewusst erwarten würde.<sup>93</sup> Was die Frequenz des Nachhalls betrifft, so sollte in einem Raum für Sprachdarbietungen die Nachhallzeit unterer Frequenzen nicht zu lang sein, da sie sonst die für die Sprachverständlichkeit wichtigen mittleren und oberen Frequenzbereiche verdecken würde.<sup>94</sup>

### *3.2.3 SPRACHVERSTÄNDLICHKEIT, ARTIKULATIONSVERLUST BEI KONSONANTEN, KLARHEITSMAB DEUTLICHKEITSMAB, SPRACHÜBERTRAGUNGSINDEX*

Für die Beurteilung der Raumakustik ist es möglich aus der Impulsantwort noch andere Parameter abzuleiten.<sup>95</sup> Gerade für Räume, die nicht oder nicht ausschließlich für musikalische Darbietungen gedacht sind, also jede Form der Mischnutzung bis zu reinen Vortragssälen, sind Parameter wie Sprachverständlichkeit und der Artikulationsverlust bei Konsonanten wichtige Indikatoren für eine „gute Akustik“. Zusammenfassen lassen sich diese Parameter unter dem Begriff Hörsamkeit. Die Hörsamkeit eines Raumes definiert seine akustische Eignung für Schalldarbietungen bestimmter Art.<sup>96</sup>

---

<sup>92</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 270

<sup>93</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 177f

<sup>94</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 184

<sup>95</sup> Vgl. Fasold, Veres, 2003, S. 149f

<sup>96</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 206

### 3.2.3.1 Sprachverständlichkeit

Sprachverständlichkeit ist die direkte Messung der Verständlichkeit von Wörtern oder Sätzen beim Publikum. Die direkteste Art der Messung erfolgt durch Vorlesen von bestimmten Wörtern oder Nonsens – Silben, welche durch die Zuhörer erkannt werden sollen. Die Wörter oder Silben werden in unterschiedlicher Lautstärke und mit unterschiedlichen Störgeräuschen, meist Rauschen, dargeboten. Sowohl real Vorgelesenes als auch von Band abgespieltes Material wird verwendet, wobei sich vom Band Abgespieltes natürlich leichter kontrollieren lässt und gleichmäßiger dargeboten werden kann.<sup>97</sup>

In welchem Ausmaß Störgeräusche die Sprachverständlichkeit beeinflussen wird hängt von der ‚signal-to-noise ratio‘ ab, also von dem Verhältnis zwischen Nutz- und Störsignal. Es errechnet sich einfach durch die Subtraktion des Störschallpegels vom Nutzscharpegel und wird demzufolge auch in dB angegeben.<sup>98</sup>

Intelligibility of different types of test materials in the presence of noise. Speech intelligibility is shown as a function of speech-to-noise ratio for sentences, monosyllabic words, and nonsense syllables.

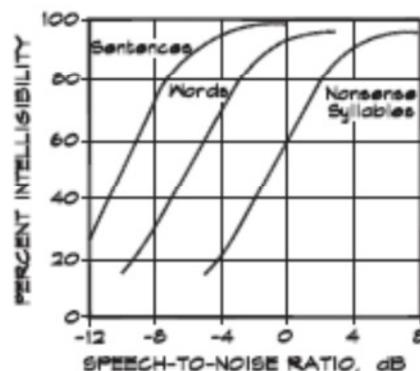


Abb. 10 Sprachverständlichkeit von Sätzen, Wörtern und Nonsens-Silben dargestellt als Funktion<sup>99</sup>

Wie in Abb. 10 dargestellt ist es selbst bei einer negativen signal-to-noise ratio, sprich wenn das Störsignal lauter ist als das Nutzsignal, möglich gerade bei vollständigen Sätzen ein sehr hohes Maß an Verständlichkeit zu erhalten. Das ist durch die außergewöhnliche

<sup>97</sup> Vgl. Long, 2006, S. 93

<sup>98</sup> Vgl. Long, 2006, S. 94

<sup>99</sup> Vgl. ebd.

Leistung des Gehirns zu erklären, welches es schafft, das Nutzsinal herauszufiltern und fehlende Information von selbst zu ergänzen. Bei 60% verstandenen Wörtern liegt die Erkennung von Sätzen immer noch bei etwa 90%. Sinkt die Rate der verstandenen Wörter allerdings unter 60%, fällt die Sprachverständlichkeit rapide ab.<sup>100</sup>

### 3.2.3.2 Artikulationsverlust bei Konsonanten

Der Artikulationsverlust bei Konsonanten (articulation loss of consonants,  $AL_{\text{cons}}$ ) ist eine andere Möglichkeit die Sprachverständlichkeit zu messen oder in Zahlen auszudrücken. Er gibt das Verhältnis von missverstandenen Konsonanten zu richtig verstandenen an. Peutz publizierte 1971 eine Formel zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit unverstärkter Sprache in Räumen.<sup>101</sup>

$$16^{102} \quad AL_{\text{CONS}} = \frac{200r^2T_{60}^2}{V} + a$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in Sekunden

$V$ ...Raumvolumen in  $\text{m}^3$

$r$ ...Abstand Sprecher-Hörer in m

$a$ ...Korrekturfaktor

Der Korrekturfaktor von Peutz kann zwischen 1,5% und 12,5% schwanken in Abhängigkeit von den ‚Fähigkeiten‘ des Hörers. Diese Gleichung funktioniert, solange sich der Hörer in einem gewissen Abstand zum Sprecher befindet.

$$17^{103} \quad r_l = 0,21 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in Sekunden

$V$ ...Raumvolumen in  $\text{m}^3$

Das ist der Abstand an dem der Pegel des Direktschalls um 10 dB unter den Pegel des Nachhalls fällt. Ab dieser Distanz gilt folgende Formel:

---

<sup>100</sup> Vgl. Long, 2006, S. 94

<sup>101</sup> Vgl. Long, 2006, S. 97

<sup>102</sup> Vgl. Long, 2006, S. 594

<sup>103</sup> Vgl. ebd.

$$18^{104} \quad AL_{CONS} = 9T_{60} + a$$

$T_{60}$ ... Nachhallzeit in s

a...Korrekturfaktor

### 3.2.3.3 Klarheitsmaß ( $C_{80}$ )

Das Klarheitsmaß stellt ein Verhältnis zwischen dem Direktschall und später eintreffenden Reflexionen dar.

$$19^{105} \quad C = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\int_0^{80ms} [g(t)]^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right] dB$$

wobei  $g(t)$  die Impulsantwort des Raums ist.

$$20^{106} \quad g(t) = \sum_n a_n \delta(t - t_n)$$

$\delta(t)$ ...Diracsche Deltafunktion

$t_n$ ...verzögert eintreffende Signale

Bradley hat mit verschiedenen Cut-off Zeiten gearbeitet (u.a. 35 ms, 50 ms, 80 ms, 95 ms) und 1986 festgestellt, dass die Unterschiede zwischen 50 ms und 95 ms nicht besonders groß sind.<sup>107</sup>

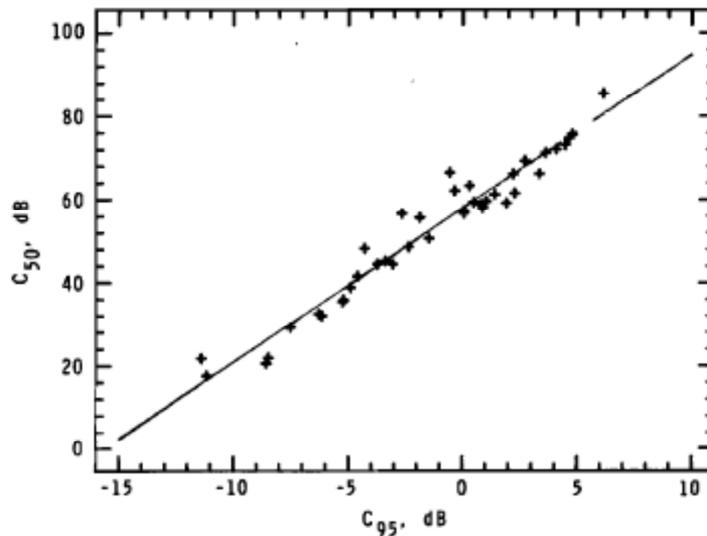
---

<sup>104</sup> Vgl. Long, 2006, S. 594.

<sup>105</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 257

<sup>106</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 255

<sup>107</sup> Vgl. Bradley, 1986, S. 843



**Abb. 11** Gemessene Unterschiede zwischen 50 ms Cut-Off Zeit und 95 ms Cut-Off Zeit<sup>108</sup>

Das Klarheitsmaß wird heute in der Regel dazu verwendet, um eine Aussage über die ‚Klarheit‘ oder ‚Durchsichtigkeit‘ von Musik zu ermöglichen. Reichardt et al. fanden 1974 heraus, dass ein Wert von  $C = 0$  dB auch für schnelle Musikpassagen für die subjektive Klarheit ausreichend ist, sogar ein Wert von  $C = -3$  dB noch als ausreichend angesehen werden kann.<sup>109</sup> Gade untersuchte 1994 mehrere Konzertsäle in den USA und Europa und fand typische Klarheitswerte im Bereich von  $-5$  dB bis  $+3$  dB. Heute wird meist eine Cut-Off Zeit von 80ms angenommen, da bei Musik im Gegensatz zur Sprache Reflektionen nicht so stark wahrgenommen werden.<sup>110</sup>

### 3.2.3.4 Deutlichkeit ( $D_{50}$ )

Die Deutlichkeit kennzeichnet den Anteil an Ersten Reflektionen bis zur Cut-Off Zeit von 50 ms.

Die Deutlichkeit  $D_{50}$  benutzt im Vergleich zum Klarheitsmaß in der Regel eine kürzere Cut-Off Zeit von 50 ms, da die Deutlichkeit eher dazu verwendet wird, um auf die Sprachverständlichkeit zu schließen.<sup>111</sup>

<sup>108</sup> Vgl. Bradley, 1986, S. 843.

<sup>109</sup> Vgl. Reichardt et al., 1974, S.243ff

<sup>110</sup> Vgl. Gade, 1996, S. 4f

<sup>111</sup> Vgl. Thiele, 1953, S. 291ff

$$21^{112} \quad D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} \cdot 100\%$$

Wobei  $g(t)$  wieder die Impulsantwort des Raumes ist (siehe Formel Nummer 19).

Die Deutlichkeit geht auf Thiele (1953) zurück.<sup>113</sup>

### 3.2.3.5 Sprachübertragungsindex (STI)

Der Sprachübertragungsindex stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Sprachverständlichkeit zu beurteilen. Eingeführt wurde der Sprachübertragungsindex von Houtgast und Steenecken 1973. Der STI leitet sich aus der Modulationsübertragungsfunktion MTF ab. Die MTF misst die Abschwächung der Amplitude eines Sprachsignals und seiner Spektralkomponenten durch den Nachhall.<sup>114</sup>

Die Modulationsübertragungsfunktion wird definiert durch

$$22^{115} \quad m(\omega_m) = \frac{\left| \int_0^{\infty} g(t) e^{-j\omega_m t} dt \right|}{\int_0^{\infty} g(t) dt} [1 + 10^{-0,1L_{SN}}]^{-1}$$

wobei  $\omega_m$  die Modulationsfrequenz  $\omega_m = 2\pi f_m$  ist und  $L_{SN}$  der Signal-Rausch-Abstand  $L_{SN} = 10\log(I_{\text{out}}/I_n)$ .

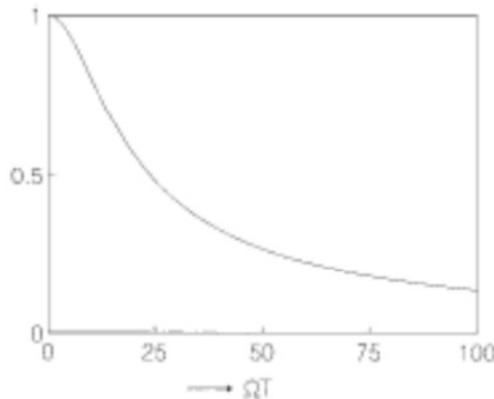
---

<sup>112</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 255

<sup>113</sup> Vgl. Thiele, 1953, S. 291ff

<sup>114</sup> Vgl. Houtgast, Steenecken, 1973, S. 557

<sup>115</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 596



**Abb. 12** Modulationsübertragungsfunktion eines Raumes mit exponentiell abfallendem Ausklingverhalten ( $T =$  Nachhallzeit,  $\Omega =$  Kreismodulationsfrequenz)<sup>116</sup>

Houtgast und Steenecken haben ein Verfahren entwickelt MTF Daten aus sieben verschiedenen Oktavbändern und 14 verschiedenen Modulationsfrequenzen zu einer einzigen Kurve zusammen zu fassen, die sie Sprachübertragungsindex (STI) nannten. Der Sprachübertragungsindex berücksichtigt die Sprachverständlichkeit einzelner Oktavbänder und die gegenseitige Maskierung benachbarter Frequenzbänder im Ohr. Houtgast und Steenecken konnten in mehreren Experimenten nachweisen, dass der STI sehr stark mit den Ergebnissen verschiedener Sprachverständlichkeitstest korreliert.<sup>117</sup>

### 3.3 RAUMAKUSTIK VON AUFNAHMESTUDIOS

Im Großen und Ganzen gilt auch hier, was oben zur akustischen Beschaffenheit von Räumen mit einem bestimmten akustischen Zweck gesagt wurde. Anders als bei Räumen für musikalische Darbietungen oder Sprachdarbietungen müssen hier oftmals die ersten Reflexionen stark bedämpft werden. Im Gegensatz zum zweiohrigen Hören können diese Reflexionen bei Mikrofonaufnahmen Klangverfälschungen verursachen. Die Ursache sind zu starke und/oder zu frühe Schallrückwürfe, an die Position des Mikrofons, mit einer Laufzeitdifferenz zum Direktschall von etwa 15 ms bis 50 ms. Bei kleineren Studios wird die Klangfärbung durch Rückwürfe mit einer Laufzeitdifferenz von nur 0,8 ms bis

<sup>116</sup> Vgl. Kuttruff, 2009, S. 227

<sup>117</sup> Vgl. Houtgast, Steenecken, 1980, S. 318ff

15 ms oftmals als störend empfunden. Diese Klangfärbung bleibt aber unhörbar, solange sie im Vergleich zum Direktsignal leise ist.<sup>118</sup>

### *3.3.1 NACHHALLZEIT VON AUFNAHMESTUDIOS*

In Hörspielstudios stehen meist mehrere Räume mit unterschiedlichen Nachhallzeiten zur Verfügung, angefangen von einem schalltoten Raum oder einer sehr stark bedämpften Ecke bis hin zu Studios mit einer Nachhallzeit von 0,4, 0,6 oder sogar 1 Sekunde. Der „schalltote“ oder sehr reflexionsarme Raum eines Hörspielstudiokomplexes wird mit einer Nachhallzeit unter 0,2 Sekunden gebaut. Erreicht wird diese Zeit durch vollflächige Belegung der Wände und der Decke mit Mineralfasermatten in einer Dicke von etwa dreißig Zentimetern und einem mit einem dicken, weichen Teppich belegten Boden.

Für reine Sprecherstudios oder Interviewstudios gilt ähnliches wie für den stark bedämpften Raum eines Hörspielstudios. Sobald der Sprecherplatz und der Mikrofonplatz gewählt sind, lassen sich durch gezielte akustische Verkleidungen der Wände störende Reflexionen von Wänden, der Decke oder einem Tisch ausreichend bedämpfen und eine Nachhallzeit von 0,2 bis 0,3 Sekunden realisieren.

Für tiefe Frequenzen unter 80 Hz ist bei beiden, die Nachhallzeit etwas länger, da Sprache in diesem Frequenzbereich keine hörbaren Komponenten enthält.<sup>119</sup>

Da große Aufnahmestudios für E-Musik oftmals auch als Konzertsäle in Verwendung sind, orientieren sich ihre Nachhallzeiten an denen von Konzertsälen.<sup>120</sup>

Obwohl natürlich immer die Möglichkeit besteht, einer vorhandenen Aufnahme künstlichen Hall aus einem Hallgerät hinzuzufügen, macht es manchmal Sinn, ein Studio oder einen Raum so zu bauen, dass sich die Nachhallzeit verändern lässt. Mechanische Lösungen sind sehr aufwendig, dennoch sinnvoll, wenn zum Beispiel eine Anpassung eines großen Studios an die Situation mit oder ohne Publikum gewünscht ist. Ermöglicht wird die Veränderung der Nachhallzeit durch verdeckte Rollos oder wendbare Wand- und Deckenverkleidungen, deren eine Seite zum Beispiel absorbierend, die andere

---

<sup>118</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 280ff

<sup>119</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 291ff

<sup>120</sup> Vgl. Weinzierl, 2008, S. 293

reflektierend gestaltet sein kann. Weiters besteht die Möglichkeit mit elektroakustischen Mitteln, sprich Mikrofonen und Lautsprechern, nachzuhelfen. So werden je nach Saalgröße 50 bis 150 Mikrofone an der Decke montiert, die den Diffusschall eines Raumes aufnehmen. Dann wird nach der Verstärkung jedes Mikrofonsignal je einem der Lautsprecher zugeführt, welcher ebenfalls an der Decke oder den Wänden montiert sind. Mit diesem System lassen sich nicht nur die Nachhallzeit und der Frequenzgang des Nachhalls beeinflussen, sondern auch Beschallungen durchführen. Doch elektroakustische Systeme werden im Allgemeinen von Musikern und Musikliebhabern in der sogenannten E-Musik, strikt abgelehnt. Ähnliches gilt für das Theater. Einzig bei Musicals wird eine elektroakustische Verstärkung für Sprache, Gesang und Musik von den Darstellern und dem Publikum akzeptiert.<sup>121</sup>

---

<sup>121</sup> Vgl. Dickreiter, 1997, S. 47

## 4. MESSUNG RAUMAKUSTISCHER PARAMETER AM BEISPIEL DER AULA LOUNGE IN DER AULA DER WISSENSCHAFTEN

Die Aula der Wissenschaften wurde im 17. Jahrhundert errichtet. Kaiser Ferdinand II übergab 1623 dem Jesuitenorden im Zuge der Gegenreformation die Führung der Universität. Daraufhin begannen die Jesuiten den damals schon bestehenden Universitätskomplex neu- und umzugestalten. Die heutige Aula der Wissenschaften diente den Jesuiten als Repräsentationsraum für Promotionen, Disputationen, Festen und Versammlungen, vor allem aber der 2. Stock als Theatersaal.<sup>122</sup>

Nach der Reform des Bildungswesens durch Maria Theresia, die den Jesuiten das Theater abkaufte, wurde dieses Mitte des 18. Jahrhunderts zu einem Museum umgebaut.<sup>123</sup>

Im 19. Jahrhundert dann fand eine Sammlung des Naturhistorischen Museums ihren Platz im ehemaligen Theatersaal der heutigen Aula. In den unteren Geschoßen befand sich das Akademische Gymnasium (nach 1852 auch Universitätsgymnasium genannt).<sup>124</sup>

Nach der Übersiedelung des Akademischen Gymnasiums an den heutigen Standort am Beethovenplatz erwarb die ‚Wiener Zeitung‘ die Aula der Wissenschaften. Im Theatersaal wurde eine Zwischendecke eingezogen. Von da an befanden sich oberhalb der Zwischendecke die Setzerei, darunter die Buchbinderei und in den darunter liegenden Geschoßen die Druckerei und Büroräumlichkeiten.<sup>125</sup>

Im 2. Weltkrieg wurde die Aula 1944 von einer Fliegerbombe getroffen, die das Dach sowie zwei weitere Stockwerke durchschlug und als Blindgänger auf Papierballen liegen blieb.<sup>126</sup>

Die 1948 begonnene Restaurierung dauerte bis 1951. Von da an wurden die Räumlichkeiten der ‚Alten Aula‘, entgegen ersten Plänen, die ein neues Theater vorsahen,

---

<sup>122</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, S. 20

<sup>123</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, S. 29

<sup>124</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, S.31

<sup>125</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, S. 31f

<sup>126</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, S. 33

vom damaligen Ministerium für Handel und Wiederaufbau, ein alter Name des heutigen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend, verwendet.<sup>127</sup>

Von 2003 bis 2006 wurde die Aula der Wissenschaften generalsaniert und wird nun seitdem als moderne Eventlocation bespielt.

Die sogenannte Aula Lounge, die in dieser Arbeit behandelt wird, befindet sich im Erdgeschoß, rechts des Haupteingangs. Ursprünglich war dieser Raum eine Kapelle, heute wird er als multifunktionaler Veranstaltungssaal genutzt, wobei die Hauptnutzung im Kongress- und Vortragsbereich liegt.



**Abb. 13** Grundriss des Erdgeschoß der Aula der Wissenschaften. Der schraffierte Bereich markiert die Aula Lounge<sup>128</sup>

<sup>127</sup> Vgl. Deckenmalerei Theater Saal, 33f

<sup>128</sup> Arch. DI Rudolf Prohazka, Ausführungsplan, 2001, vom Autor modifiziert

## 4.1 VERSUCHSAUFBAU

Die Messung erfolgte im Rahmen der Lehrveranstaltung 160147 PR Praktische Einführung in die raumakustische Messtechnik und Analyse im Sommersemester 2012 von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz am Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien.

Durchgeführt wurde die Messung von den Teilnehmern der Lehrveranstaltung unter Zuhilfenahme von Herrn Dipl.-Phys. Lorenz-Kierakiewitz und dem Institut für Musikwissenschaft zur Verfügung gestelltem Equipment. Zur Verwendung kamen Messmikrophone der Typen DPA 4007 und Esper K4, Schallpegel-Kalibratoren der Typen ND9 (94 dB & 114 dB) und Norsonic 1251 (114 dB), ein Leistungsverstärker des Typs Schalltechnik Süd&Nord SPA600X und Rauschgeneratoren des Typs NTI Instruments Minirator Pro und der in den SPA600X integrierte Rauschgenerator. Aufgenommen wurde mit externen USB-Soundkarten und den Laptops der Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Lehrveranstaltung direkt in das Programm Cool Edit 96.

Als Impulsschallquelle dienten platzende Luftballons, da diese im Vergleich zu Schreckschusspistolen ein über das Frequenzspektrum etwas günstiger verteiltes und vor allem ein kürzeres Signal abgeben. Sofern die Luftballons mit an der Spitze, also genau gegenüberliegend zum Lufteinlass, zum Platzen gebracht werden, eignen sie sich hervorragend als Punktschallquelle. Als Punktschallquelle für das Rauschen kam ein für diesen Zweck entwickelter Breitbandlautsprecher der Firma Peutz Consult GmbH zum Einsatz.

Gemessen wurde in vordefinierten Abständen zur Schallquelle.

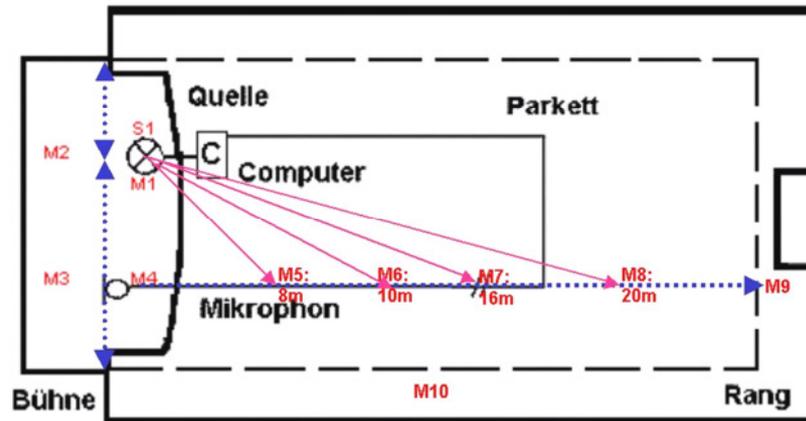


Abb. 14 Skizze der Messpfade<sup>129</sup>

## 4.2 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Für die Messungen wurden die Messmikrophone an den erläuterten Messpunkten aufgestellt und mit dem Kalibrator kalibriert und zwar so, dass die  $94 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  des Kalibrators  $-6 \text{ dB}_{\text{FS}}$  in Cool Edit 96 entsprechen. Das bedeutet, dass  $0 \text{ dB}_{\text{FS}}$   $100 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  entsprechen.

Zuerst wurde bei eingeschaltetem Licht, eingeschalteter Lüftung und Bestuhlung für 80 Personen der Hintergrundschaallpegel und rosa Rauschen aufgenommen. Danach der Hintergrundschaallpegel ohne Licht und Lüftung. Trotz Ausschalten aller Haustechnischen Anlagen blieb ein tonales Geräusch im Hintergrundpegel zurück.

Dann wurden die Messmikrophone erneut kalibriert, allerdings mit  $114 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ , so dass dann  $0 \text{ dB}_{\text{FS}}$   $120 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  entsprachen. Dies war nötig um die höheren Schallpegel der platzenden Luftballone auch in geringer Entfernung verzerrungsfrei aufnehmen zu können. Eine Messung im leeren Raum wurde auch vorgenommen, allerdings dürfte diese auf Grund des geringen Absorptionsgrads der Bestuhlung (Lammhults Campus Armchair) kaum einen Unterschied ergeben.

In einer weiteren Messreihe wurde an den Messpunkten Q1 bis Q4 gemessen und am Ort der Schallquelle Luftballone zum Platzen gebracht.

<sup>129</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Hr. Dipl.-Phys. Lorenz-Kierakiewitz

Für die Messung der hauseigenen PA-Anlage wurde ein Signal durch das Mischpult auf die Lautsprecher geschickt und im Abstand von 1m, 4m, 8m und 12m gemessen.

### 4.3 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

Bei den Ergebnissen der Messungen mit Ballons im unbestuhlten Zustand zeigt sich, was durch die reine Betrachtung des Grundrisses und der vorherrschenden Materialien schon zu vermuten war: Die Sprachverständlichkeit ist auf Grund der für einen Vortragssaal viel zu hohen Nachhallzeit nur auf geringe Distanz ausreichend.

Es zeigt sich weiter, dass obwohl sich der errechnete STI nicht sehr weit von ausreichenden Werten entfernt, die Deutlichkeit  $D_{50}$  und das Klarheitsmaß  $C_{50}$  deutlich sinken und der  $AL_{CONS}P88$  deutlich steigt.

Zur den Auswertungen sei noch gesagt, dass die Nachhallzeit  $T_{30}$  eine extrapolierte Nachhallzeit ist. Da viele Aufnahmesysteme nicht die nötige Dynamik , um die gesamte Nachhallzeit zu messen, wird nur die Zeit gemessen, die der Nachhall benötigt um 30 dB zu sinken, und diese Zeit wird dann verdoppelt als  $RT_{30}$  oder  $T_{30}$  angegeben.

Die Auswertungen zeigen (Abbildungen im Anhang) die eingangs erwähnte deutliche Abweichung der raumakustischen Parameter vom Ideal.

(Ø 125 Hz - 4 kHz)	1m	4m	8m	10m	16m
$C_{50}$	2,4 dB	-4,1 dB	-6,2 dB	-6,7 dB	-8,2 dB
$C_{80}$	3,6 dB	-1,5 dB	-3,8 dB	-4,2 dB	-5,4 dB
$D_{50}$	63 %	30 %	21 %	19 %	15 %
$T_{30}$	3,7 s	3,7 s	3,8 s	3,9 s	4,1 s
$AL_{CONS}P88$	8,2 %	17,7 %	21,8 %	24,5 %	24,6 %
STI	0,64	0,49	0,43	0,43	0,39

**Abb. 15** Tabelle einiger raumakustischer Parameter im Vergleich zur Entfernung<sup>130</sup>

<sup>130</sup> Von Autor erstellt

Wie in der zusammenfassenden Tabelle in Abbildung 22 ersichtlich ist die Sprachverständlichkeit unverstärkter Sprache schon in 4m Entfernung nicht mehr ausreichend gegeben, um einem Vortrag über einen längeren Zeitraum mit ausreichender Konzentration folgen zu können. Die Sprachverständlichkeit sinkt erwartungsgemäß mit steigender Entfernung. Die an den letzten Messpunkten ansteigende Nachhallzeit ist eventuell auf die räumliche Nähe zu dem rechteckigen Teil der Aula Lounge zurückzuführen. Es zeigt sich allerdings, dass sich, zumindest gemäß der ermittelten Werte, die Aula Lounge gut für musikalische Darbietungen aus der E-Musik eignet.

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Oktavbänder zeigt sich, dass die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich am höchsten ist und zu den hohen Frequenzen hin abnimmt. Das zeigt den Einfluss von Materialien und Oberflächen beziehungsweise der Größe von Objekten und deren Einfluss auf das Reflexionsverhalten der unterschiedlichen Frequenzen. Auch spielt die Luftschalldämmung, also der Verlust von hohen Frequenzen auf Grund von Reibungsverlusten in der Luft bei der Ausbreitung, bei den entfernten Messpunkten eine Rolle. In den folgenden Tabellen ist auch der Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und anderen raumakustischen Parametern deutlich zu sehen.

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
C <sub>80</sub>	1,8 dB	1,1 dB	2,1 dB	3,6 dB	6,6 dB	6,3 dB	11,9 dB
D <sub>50</sub>	58 %	47 %	56 %	63 %	78 %	76 %	91 %
T <sub>30</sub>	4,45 s	4,82 s	4,25 s	3,74 s	3,01 s	2,2 s	1,12s

**Abb. 16** Tabelle akustischer Parameter in den einzelnen Oktavbändern in 1m Abstand<sup>131</sup>

---

<sup>131</sup> Vom Autor erstellt

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
C <sub>80</sub>	-4,5 dB	-4,8 dB	-2,3 dB	-0,6 dB	1 dB	2,2 dB	6,4 dB
D <sub>50</sub>	14 %	19 %	25 %	33 %	42 %	45 %	67 %
T <sub>30</sub>	4,37 s	4,58 s	4,22 s	3,78 s	3,03 s	2,31 s	1,29 s

**Abb. 17** Tabelle akustischer Parameter in den einzelnen Oktavbändern in 4m Abstand<sup>132</sup>

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
C <sub>80</sub>	-5 dB	-5 dB	-6,3 dB	-4,5 dB	-2,2 dB	0,2 dB	4,6 dB
D <sub>50</sub>	12 %	17 %	13 %	20 %	23 %	40 %	64 %
T <sub>30</sub>	4,35 s	4,91 s	4,28 s	3,96 s	3,11 s	2,37 s	1,22 s

**Abb. 18** Tabelle akustischer Parameter in den einzelnen Oktavbändern in 8m Abstand<sup>133</sup>

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
C <sub>80</sub>	-7,6 dB	-6,2 dB	-4,1 dB	-3,1 dB	-3,7 dB	-0,7 dB	3,8 dB
D <sub>50</sub>	11 %	11 %	15 %	21 %	22 %	35 %	60 %
T <sub>30</sub>	4,52 s	4,97 s	4,41 s	4,11 s	3,16 s	2,46 s	1,21 s

**Abb. 19** Tabelle akustischer Parameter in den einzelnen Oktavbändern in 10m Abstand<sup>134</sup>

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
C <sub>80</sub>	-7,2 dB	-5,6 dB	-7,5 dB	-7,2 dB	-4,1 dB	-0,9 dB	5,7 dB
D <sub>50</sub>	8 %	12 %	6 %	11 %	21 %	30 %	70 %
T <sub>30</sub>	4,81 s	5,11 s	4,54 s	4,11 s	3,28 s	2,55 s	1,37 s

**Abb. 20** Tabelle akustischer Parameter in den einzelnen Oktavbändern in 16m Abstand<sup>135</sup>

<sup>132</sup> Vom Autor erstellt

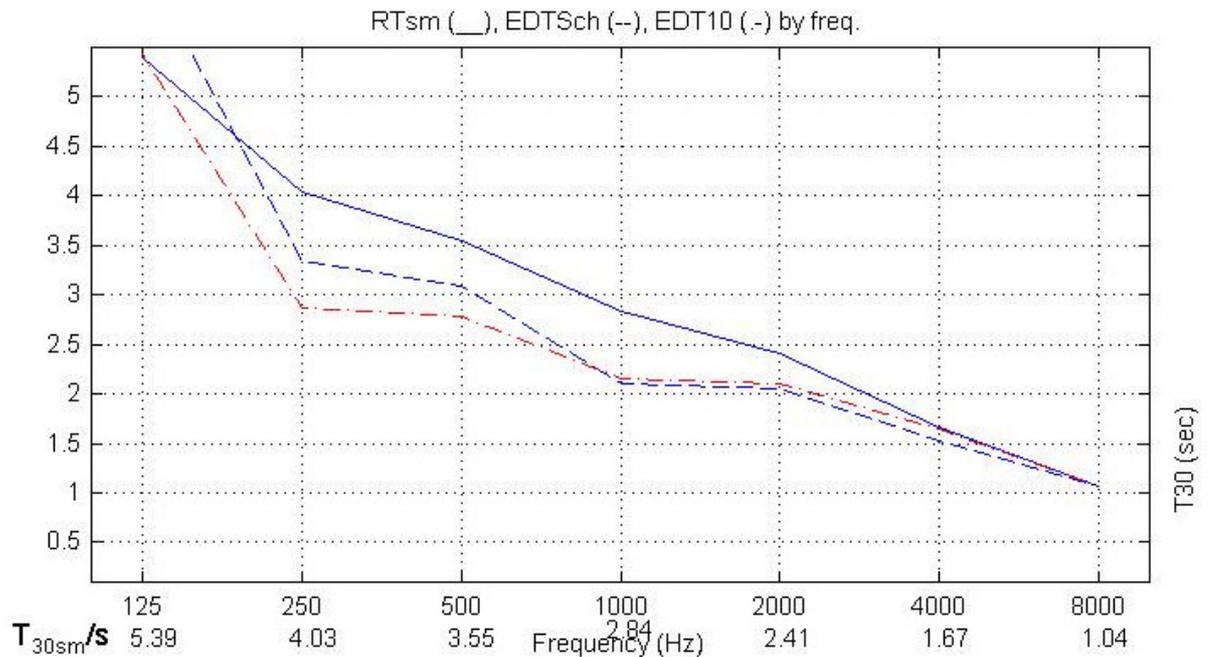
<sup>133</sup> Vom Autor erstellt

<sup>134</sup> Vom Autor erstellt

<sup>135</sup> Vom Autor erstellt

Es zeigt sich deutlich, dass mit sinkender Nachhallzeit die Deutlichkeit  $D_{50}$  und das Klarheitsmaß  $C_{80}$  zunehmen.

Die Ergebnisse der Messungen der hauseigenen PA-Anlage zeigen ähnliche Werte, wie die Messungen des Raumes an sich. Auch hier ist die Nachhallzeit vor allem im tieffrequenten Bereich deutlich zu hoch.



**Abb. 21** Graph der durchschnittlichen Nachhallzeit  $T_{30}$  in einem Abstand von 1m zur Schallquelle<sup>136</sup>

Der STI liegt bei 1m Entfernung bei 0,46, der  $AL_{CONS}P88$  bei 15,1%. Das zeigt, dass die Sprachverständlichkeit rein rechnerisch schon bei nur 1m Abstand an der Grenze liegt. Mit zunehmendem Abstand sinken diese Werte weiter.

<sup>136</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

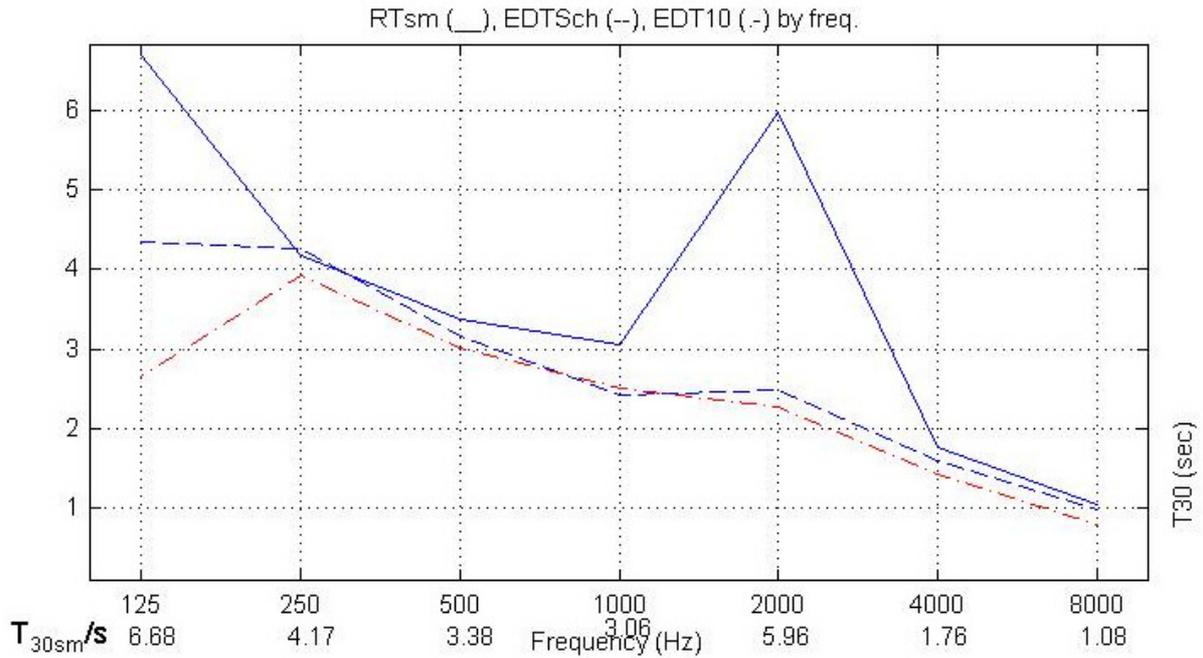


Abb. 22 Errechnete Nachhallzeit und Early Decay Time bei 4m Abstand<sup>137</sup>

In 4m Abstand liegt der STI schon bei 0,33 und der  $AL_{CONS}P88$  bei 18,3%.

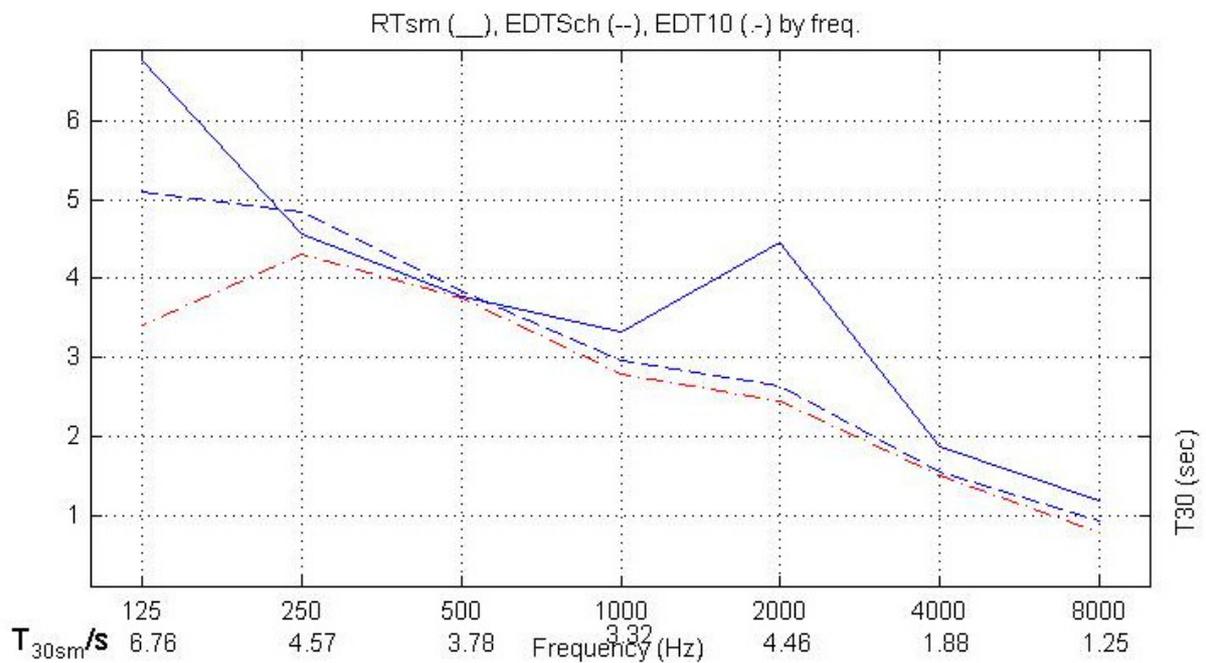


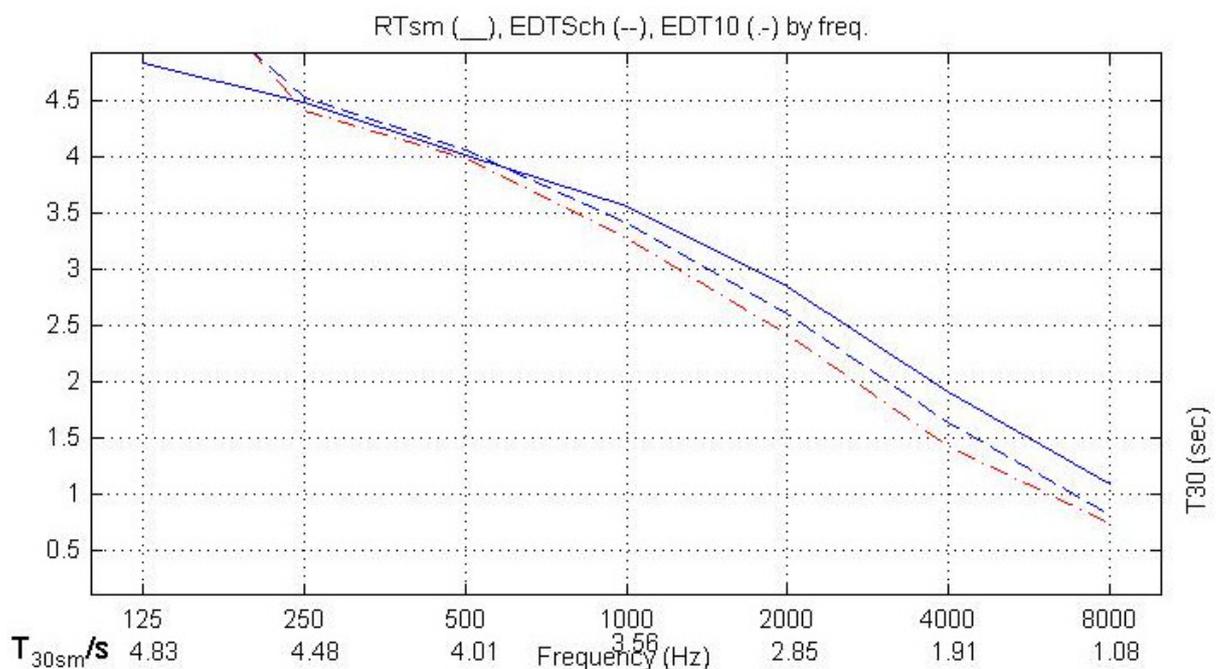
Abb. 23 Errechnete Nachhallzeit und Early Decay Time bei 8m Abstand<sup>138</sup>

<sup>137</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

<sup>138</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Erhöht sich der Abstand zur Schallquelle auf 8m fällt der Sprachübertragungsindex weiter auf 0,23 und der Prozentsatz an missverstandenen Konsonanten wächst weiter auf 19,1%.

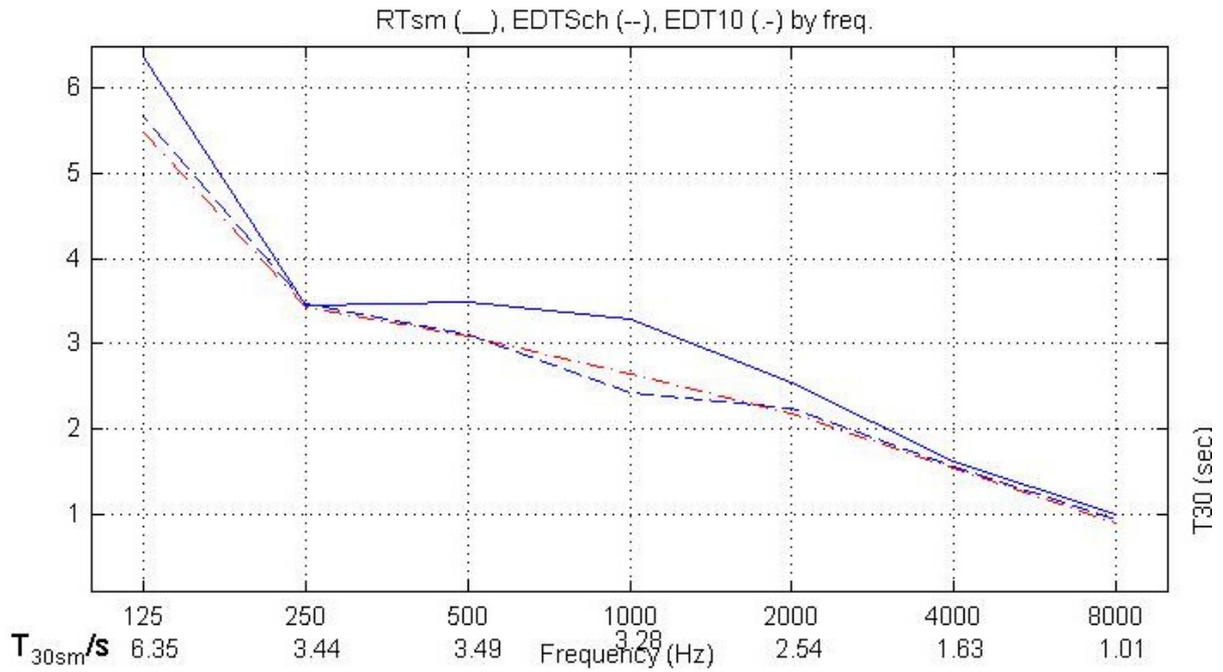
Der Grund für die starken Ausschläge der Nachhallzeit bei 2000 Hz liegt daran, dass in dem Oktavband rund um diese Frequenz ein sehr hohes Hintergrundrauschen im System vorhanden war. Das führte zu einem unnatürlichen Ausschlag und einer, auf Grund der starken Abhängigkeit des STI von diesem Oktavband, falschen Berechnung des STI und des  $AL_{CONS}(STI)$ . Der  $AL_{CONS}P88$  ist von dieser Anomalie nicht betroffen. Grundsätzlich kann man annehmen, da sich wie in Abbildung 31 ersichtlich, diese Anomalie bei 2000 Hz bei 12m Abstand nicht mehr zeigt, auch bei 4m und 8m Abstand die Nachhallzeit in dieser Oktave sich zwischen den Werten für das Frequenzband um 1000Hz und das Frequenzband um 4000 Hz bewegt.



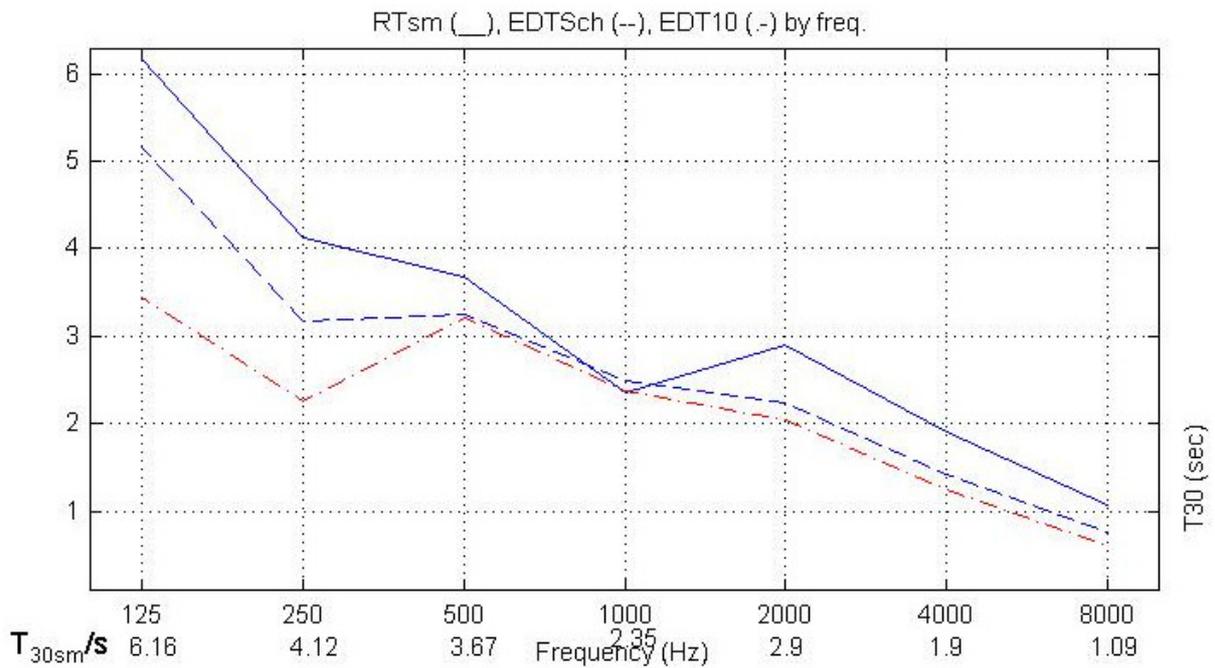
**Abb. 24** Errechnete Nachhallzeit und Early Decay Time bei 12m Abstand<sup>139</sup>

Korrigiert man die Kurven der Nachhallzeit bei 4m und 8m um diesen Störfaktor, erhält man folgendes Bild:

<sup>139</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz



**Abb. 25** Errechnete Nachhallzeit und Early Decay Time bei 4m Abstand mit der Korrektur des durch Rauschen verursachten falschen Werts bei 2000 Hz.<sup>140</sup>



**Abb. 26** Errechnete Nachhallzeit und Early Decay Time bei 8m Abstand mit der Korrektur des durch Rauschen verursachten falschen Werts bei 2000 Hz.<sup>141</sup>

<sup>140</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

<sup>141</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Auch die Analyse der einzelnen Oktavbänder unterstützt dieses Ergebnis. Es zeigt sich, dass die Nachhallzeit im Bassbereich die Werte von Kirchen erreichen, was zu der ursprünglichen Nutzung des Raumes passt. (Abbildungen der Auswertungen im Anhang)

Auch bei steigendem Abstand zeigt sich, dass sich die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich nicht ändert.

Bei der Betrachtung der Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich, in der sich Sprache vorwiegend bewegt, zeigt sich, dass die Nachhallzeit deutlich über dem gewünschten Wert liegt.

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ø 125–4 kHz
T <sub>30</sub>	5,39 s	4,03 s	3,55 s	2,84 s	2,41 s	1,67 s	1,08 s	3,3 s

**Abb. 27** Tabelle der Nachhallzeit pro Frequenzband in 1m Abstand<sup>142</sup>

Wie auch schon bei der Messung des Raumes beobachtet, ändert sich die Nachhallzeit bei steigender Entfernung nicht wesentlich, sondern sinkt nur mit steigender Frequenz.

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ø 125–4 kHz
T <sub>30</sub>	6,35 s	3,44 s	3,49 s	3,28 s	2,54 s	1,63 s	1,01 s	3,5 s

**Abb. 28** Tabelle der Nachhallzeit pro Frequenzband in 4m Abstand (korrigierte Version)<sup>143</sup>

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ø 125–4 kHz
T <sub>30</sub>	6,16 s	4,12 s	3,67 s	2,35 s	2,9 s	1,9 s	1,07 s	3,5 s

**Abb. 29** Tabelle der Nachhallzeit pro Frequenzband in 8m Abstand ( korrigierte Version)<sup>144</sup>

<sup>142</sup> Vom Autor erstellt

<sup>143</sup> Vom Autor erstellt

<sup>144</sup> Vom Autor erstellt

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Ø 125–4 kHz
T <sub>30</sub>	4,83 s	4,48 s	4,01 s	3,56 s	2,85 s	1,91 s	1,08 s	3,6 s

**Abb. 30** Tabelle der Nachhallzeiten pro Frequenzband in 12m Abstand<sup>145</sup>

Vergleicht man nun die Messungen des unverstärkten Raumes und der PA-Anlage, lässt sich feststellen, dass abgesehen von der zu hohen Nachhallzeit eine elektroakustische Verstärkung der Sprache unumgänglich erscheint. Einzig im Nahbereich von 1m ist eine unverstärkte Sprachdarbietung naturgemäß im Vorteil.

Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die vorhandene PA-Anlage nicht nur Vorteile birgt. Die Lautsprecher des Typs Kling & Freitag K&F CA 106 weisen eine geringe Richtwirkung auf, was dazu führt, dass nicht nur der Publikumsbereich, sondern auch Teile des Raums beschallt werden, in denen der Schall mehr schadet als nützt. Durch die Tatsache, dass durch die Verwendung mehrere Lautsprecher auch mehr Schallquellen entstehen, kann es zu lokal erhöhten Nachhallpegeln kommen. Außerdem kann es je nach Position des Hörers dazu kommen, dass an unerwarteten Positionen, etwa fern der Bühne aber näher an einem Lautsprecher, die Sprachverständlichkeit wieder steigt. Generell kann gesagt werden, dass mit steigender Zahl der Schallquellen nicht nur der nützliche Schallpegel, sondern auch der Pegel der als störend empfundenen Anteile der Raumantwort in Abhängigkeit von Frequenz und Position, zunimmt.

---

<sup>145</sup> Vom Autor erstellt

(Ø 125 Hz - 4 kHz)	1m	4m	8m	10m	16m
C <sub>50</sub>	2,4 dB	-4,1 dB	-6,2 dB	-6,7 dB	-8,2 dB
C <sub>80</sub>	3,6 dB	-1,5 dB	-3,8 dB	-4,2 dB	-5,4 dB
D <sub>50</sub>	63 %	30 %	21 %	19 %	15 %
T <sub>30</sub>	3,7 s	3,7 s	3,8 s	3,9 s	4,1 s
AL <sub>CONS</sub> P88	8,2 %	17,7 %	21,8 %	24,5 %	24,6 %
STI	0,64	0,49	0,43	0,43	0,39

(Ø 125 Hz - 4 kHz)	1m	4m	8m	12m
C <sub>50</sub>	-3 dB	-3,1 dB	-2,5 dB	-4,5 dB
C <sub>80</sub>	-1 dB	-0,8 dB	-0,8 dB	-2,5 dB
D <sub>50</sub>	34 %	35 %	37 %	29 %
T <sub>30</sub>	3,3 s	3,5 s	3,5 s	3,6 s
AL <sub>CONS</sub> P88	15,1 %	11,7 %	10 %	14,9 %
STI	0,46	0,5	0,52	0,45

**Abb. 31** Vergleich von Klarheitsmaß (C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub>), Deutlichkeit D<sub>50</sub>, Nachhallzeit T<sub>30</sub>, AL<sub>CONS</sub>P88 und Sprachübertragungsindex bei unverstärkter Messung (oben) und über die PA-Anlage (unten)<sup>146</sup>

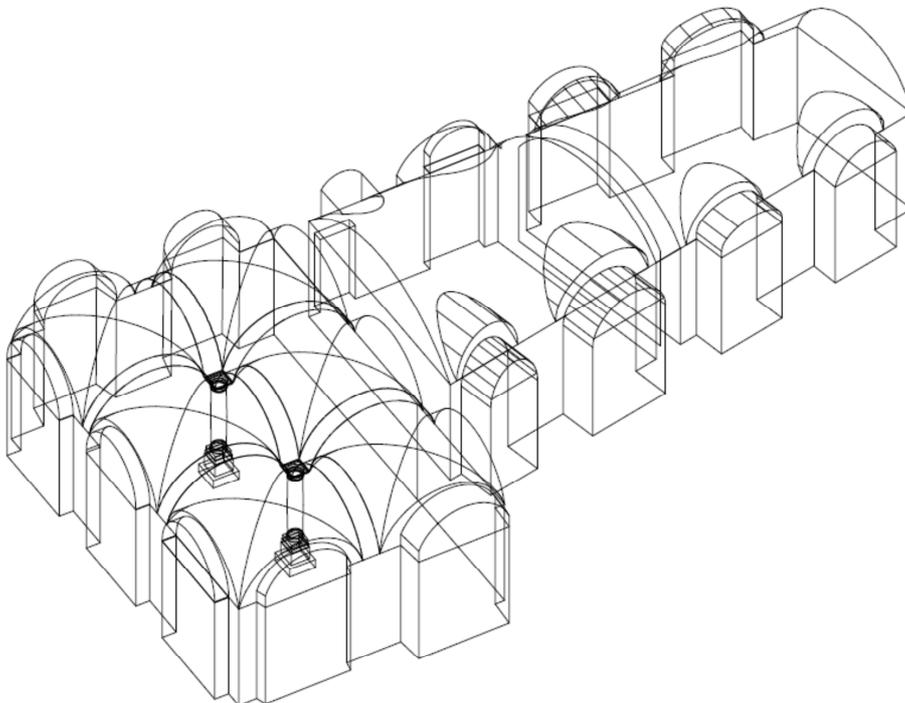
---

<sup>146</sup> Vom Autor erstellt

## 5. MÖGLICHKEITEN DER OPTIMIERUNG

Um die Aula Lounge als Vortragssaal zu erschließen muss das oberste Ziel die Reduzierung der Nachhallzeit sein. Am offensichtlichsten und wohl einfachsten kann das in diesem Fall durch eine Volumenverkleinerung erreicht werden. Das heißt am einfachsten wäre es die Aula Lounge tatsächlich in zwei Räume zu teilen und zwar in einen rechteckigen Teil, der als Vorraum genutzt werden könnte und in einen sich verjüngenden Teil, der als Vortragssaal für bis zu 120 Personen genutzt werden kann.

Die errechnete Nachhallzeit nach Sabine (siehe Formel 11, 12 und 13) beträgt für die gesamte Aula Lounge ~4,3 s. Dieser Wert weicht von den gemessenen (und gemittelten) 3,8 s ab, da auf Grund der Komplexität der Grundfläche und der Deckenflächen selbst bei der Erstellung des 3D Modells des Raumes zu Ungenauigkeiten kommt. Diese sind einerseits auf gewisse Schwächen des CAD Programms zurückzuführen, andererseits kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ausführungspläne auf denen das Modell beruht, nicht die erforderliche Genauigkeit aufweisen.



**Abb. 32** 3D Drahtgittermodell der Aula Lounge. Die Teilung des Modells in drei Einheiten war auf Grund des CAD Programms zur Ermittlung des Volumens nötig<sup>147</sup>

<sup>147</sup> Modell erstellt vom Architekturatelier Kiener ZT - KEG

$$23^{148} \quad T_{60} = 0,163 \cdot \frac{1504,25}{4mV - 1157,98 \cdot \ln(1-0,04)} = 4,3 \text{ s}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in s

$m$ ...Dämpfungskonstante der Luft

$V$ ...Volumen des Raumes in  $m^3$

Würde man nun den sich verjüngenden Teil mit Akustikelementen mit einem mittleren Absorptionsgrad von 0,8 abteilen, würde sich in diesem Teil ohne weitere Maßnahmen die Nachhallzeit auf etwa 2,4 s senken.

$$24^{149} \quad T_{60} = 0,163 \cdot \frac{732,72}{4mV - 560,57 \cdot \ln(1-0,07)} = 2,4 \text{ s}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in s

$m$ ...Dämpfungskonstante der Luft

$V$ ...Volumen des Raumes in  $m^3$

Beplankt man die dem sich verjüngenden Teil zugewandte Seite der großen Säule auch mit diesen Akustikelementen, ließe sich die Nachhallzeit weiter auf etwa 2,2 s senken. Würde man einen schweren Vorhang vor die doppelflügelige Brandschutztür (die kein Fluchtweg ist) hängen, würde sich die Nachhallzeit weiter auf etwa 1,9 s verringern.

$$25^{150} \quad T_{60} = 0,163 \cdot \frac{723,72}{4mV - 560,57 \cdot \ln(1-0,09)} = 1,9 \text{ s}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in s

$m$ ...Dämpfungskonstante der Luft

$V$ ...Volumen des Raumes in  $m^3$

---

<sup>148</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 264

<sup>149</sup> Vgl. Ebd.

<sup>150</sup> Vgl. Ebd.

Werden dann noch die Nischen mit schweren Vorhängen verhängt, ließe sich die Nachhallzeit im Mittel auf 0,6 s reduzieren.

$$26^{151} \quad T_{60} = 0,163 \cdot \frac{723,72}{4mV - 560,57 \cdot \ln(1-0,3)} = 0,6 \text{ s}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in s

$m$ ...Dämpfungskonstante der Luft

$V$ ...Volumen des Raumes in  $m^3$

Selbst ohne die Abteilung, allerdings mit Akustikelementen auf der Säule und den Vorhängen ließe sich eine Nachhallzeit um 1,2 s erreichen.

$$27^{152} \quad T_{60} = 0,163 \cdot \frac{1504,25}{4mV - 1157,98 \cdot \ln(1-0,16)} = 1,2 \text{ s}$$

$T_{60}$ ...Nachhallzeit in s

$m$ ...Dämpfungskonstante der Luft

$V$ ...Volumen des Raumes in  $m^3$

Genauere Werte erhält man, wenn man die Absorptionsgrade der unterschiedlichen Flächen nicht mittelt, sondern tatsächlich die Nachhallzeit für einzelne Frequenzbänder berechnet.

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Nachhallzeit	1,66477681	1,65128469	0,86633574	0,6001724	0,43136376	0,42286938

**Abb. 33** Tabelle der Nachhallzeiten der einzelnen Frequenzbänder bei mit Akustikelementen beplankter Trennwand und Vorhängen in den Nischen<sup>153</sup>

<sup>151</sup> Vgl. Kuttruff, 2004, S. 264

<sup>152</sup> Vgl. Ebd.

<sup>153</sup> Vom Autor erstellt

Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Nachhallzeit	2,428038	1,74114174	1,22653736	0,92807649	0,91756329	0,87252139

**Abb. 34** Tabelle der Nachhallzeiten der einzelnen Frequenzbänder bei mit Akustikelementen beplankter Säule und Vorhängen in den Nischen (ohne Trennwand)<sup>154</sup>

Es zeigt sich, dass die Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich schwerer in den Griff zu bekommen sind, was auf die vorherrschenden Materialien zurückzuführen ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass, ob mit oder ohne der Teilung der Aula Lounge, die Absorptionsfläche in den unteren drei Oktavbändern weiter vergrößert werden muss um einen lineareren Frequenzgang der Nachhallzeit zu erreichen.

---

<sup>154</sup> Vom Autor erstellt

## ZUSAMMENFASSUNG

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass eine kosteneffiziente und optisch unauffällige akustische Optimierung durchaus erreichbar ist. Sowohl die Akustik-elemente als auch schwere Vorhänge können in weiß geordert und montiert werden (zum Beispiel: FOX SOUND AB 15 bei FOX HOLZ Fußboden und Objektsysteme GmbH<sup>155</sup>, beziehungsweise: Schwerschichtvorhang SV 12 bei mbakustik GmbH<sup>156</sup>) Sollte man den Raum tatsächlich in zwei unabhängige Räume teilen, besteht unter Umständen die Möglichkeit in einer Vortragssituation auf eine elektroakustische Verstärkung der Vortragenden zu verzichten, sofern es sich um geübte Rednerinnen und Redner handelt.

Alles in Allem werden je nach Einsatz von Akustik-elementen, Trennwand und Stoffauswahl die Kosten für die akustische Optimierung im oberen vierstelligen Bereich anzusiedeln sein.<sup>157</sup>

---

<sup>155</sup> URL: <http://www.foxholz.at/raumakustik/hauptmenu/raumakustik/textile-akustik-elemente/produkt/1.html> [28.01.2013]

<sup>156</sup> URL: [http://www.mbakustik.de/main.php?target=4-6\\_medical\\_shop&userid=7683976424e79f4ab74081a913598b6b](http://www.mbakustik.de/main.php?target=4-6_medical_shop&userid=7683976424e79f4ab74081a913598b6b) [28.01.2013]

<sup>157</sup> Schätzung nach mündlicher Aussage von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

# LITERATURVERZEICHNIS

- Barron, Michael, Auditorium Acoustics and Architectural Design, Second Edition, London & New York, Spon Press, 2010
- Beranek, Leo L., Music, Acoustics, and Architecture, in Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 45, No. 8, S. 25-46, American Academy of Arts and Sciences, o.O., 1992
- Beranek, Leo L., Concert Halls and Opera Houses, Music, Acoustics, and Architecture, Second Edition, New York et al., Springer, 2004
- Bradley, J. S., Predictors of speech intelligibility in rooms, J. Acoust. Soc. Am. Volume 80, Issue 3, S. 837-845, 1986
- Bruckmayer, Friedrich, Handbuch der Schalltechnik im Hochbau, Wien, Franz Deuticke, 1962
- Cremer, Lothar, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1948
- Cremer Lothar, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 2, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1962
- Cremer, Lothar, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1, 2. Auflage, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1978
- Deckenmalerei Theater Saal – Jesuiten, Arbeitsbericht Restaurierung, 4. Zur Geschichte des Theatersaals, Akten des Bundesdenkmalamts, S. 20-34, o.J.
- Der Einfluß der Luftabsorption auf die Nachhallzeit, Akustische Informationen 2. 4-3 des IRT, o.O., 1968
- Deihl, David T., Carlson F. Roy, “N Waves” from Bursting Balloons, in American Journal of Physics, Volume 36 Number 5, S. 441-444, 1968
- Dickreiter, Michael, Handbuch der Tonstudioteknik, 6. Auflage, München, K. G. Saur Verlag, 1997
- DIN EN 12354-6 Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen, Berlin, 2004
- DIN 1320 Akustik, Begriffe, Berlin, 1997
- Evedrest, F. Dalton, Master Handbook of Acoustics, Fourth Edition, New York et al., McGraw-Hill, 2001
- Fasold, Wolfgang, Veres, Eva, Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 2. Auflage , Berlin, Huss-Medien GmbH Verlag Bauwesen, 2003
- Friesecke, Andreas, Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker, München, K. G. Saur Verlag, 2007
- Furrer, Willi, Raum- und Bauakustik für Architekten, Basel und Stuttgart, Birkhäuser Verlag, 1956

- Gade, A. C., Room acoustic properties of concert halls: quantifying the influence of size, shape and absorption area, 3rd ASA/ASJ meeting, paper 5aAA1, Honolulu, 1996
- Hall, Donald E., Musikalische Akustik, Ein Handbuch, Mainz, Schott Musik International, 1997
- Houtgast T., Steeneken H. J. M., The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility, J. Acoust. Soc. Am. Volume 54, Issue 2, S. 557, 1973
- Houtgast T., Steeneken H. J. M., A physical method for measuring speech-transmission quality, J. Acoust. Soc. Am. Volume 67, Issue 1, S. 318-326, 1980
- Kath, U., Der Einfluss der Bekleidung auf die Schallabsorption von Einzelpersonen, Acustica 17, S. 234-237, 1966
- Kuttruff, Heinrich, Akustik/Eine Einführung, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 2004
- Kuttruff, Heinrich, Room Acoustics, 4th Edition, London, Applied Science Publishers, 2000
- Kuttruff, Heinrich, Room Acoustics, Fifth Edition, London & New York, Spon Press, 2009
- Long, Marshall, Architectural Acoustics, Amsterdam et al., Elsevier Academic Press, 2006
- Lorenz-Kierakiewitz, Klaus-Hendrik, Vercammen, M., Acoustical Survey of 25 European Concert Halls, o.V., o.O., 2009
- Meyer, Jürgen, Kirchenakustik, Frankfurt am Main, Verlag Erwin Bochinsky GmbH & Co KG, 2003
- Meyer, Jürgen, Akustik und musikalische Aufführungspraxis, 5. Aktualisierte Auflage, Bergkirchen, PPVMEDIEN GmbH, Edition Bochinsky, 2004
- Michel, Eugen, Akustik und Schallschutz im Hochbau, Berlin, Walter de Gruyter & Co., 1938
- Müller, Alexander, Schallschutz in der Praxis, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- Peutz, V., Speech Information and Speech Intelligibility, Presented at the 85<sup>th</sup> AES Convention, Los Angeles, Audio Engineering Society Preprint, 1988
- Pieper, Frank, Das P.A. Handbuch, 3. Auflage, München, GC Carstensen Verlag, 2005
- Reichardt W, Abdel Alim O, Schmidt W. Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art des Musikmotivs, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit, in Applied Acoustics, Volume 7, Issue 4, 1974, S. 243-264.
- Sabine, Wallace Clement, Collected Papers on Acoustics, o.O., Cambridge Harvard University Press, 1922
- Thiele, R., Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen, Acustica 3, S. 291-302, 1953
- Tool, Floyd, Sound Reproduction, Loudspeakers and Rooms, Amsterdam et al., Focal Press, 2008

Weinzierl, Stefan, Beethovens Konzerträume: Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen, Frankfurt am Main, Verlag Erwin Bochinsky, 2002

Weinzierl, Stefan, Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Springer, 2008

# ANHANG

## ABSORPTIONSGRADE GÄNGIGER MATERIALIEN

Material	Mount	Frequency, Hz					
		125	250	500	1k	2k	4k
<b>Walls</b>							
Glass, 1/4", heavy plate		0.18	0.06	0.04	0.05	0.02	0.02
Glass, 3/32", ordinary window		0.55	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Gypsum board, 1/2", on 2x4 studs		0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Plaster, 7/8", gypsum or lime, on brick		0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Plaster, on concrete block		0.12	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04
Plaster, 7/8", on lath		0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.05
Plaster, 7/8", lath on studs		0.30	0.15	0.10	0.05	0.04	0.05
Plywood, 1/4", 3" air space, 1" batt,		0.60	0.30	0.10	0.09	0.09	0.09
Soundblox, type B, painted		0.74	0.37	0.45	0.35	0.36	0.34
Wood panel, 3/8", 3-4" air space		0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Concrete block, unpainted		0.36	0.44	0.51	0.29	0.39	0.25
Concrete block, painted		0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Concrete poured, unpainted		0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Brick, unglazed, unpainted		0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Wood paneling, 1/4", with airspace behind		0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	0.06
Wood, 1", paneling with airspace behind		0.19	0.14	0.09	0.06	0.06	0.05
Shredded-wood fiberboard, 2", on concrete	A	0.15	0.26	0.62	0.94	0.64	0.92
Carpet, heavy, on 5/8-in perforated mineral fiberboard		0.37	0.41	0.63	0.85	0.96	0.92
Brick, unglazed, painted	A	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Light velour, 10 oz per sq yd, hung straight, in contact with wall		0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Medium velour, 14 oz per sq yd, draped to half area		0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Heavy velour, 18 oz per sq yd, draped to half area		0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65

Abb. 35 Absorptionsgrade gängiger Materialien<sup>158</sup>

<sup>158</sup> Vgl. Long, Marshall, Architectural Acoustics, Amsterdam et al., Elsevier Academic Press, 2006, S. 257

Material	Mount	Frequency, Hz					
		125	250	500	1k	2k	4k
<b>Floors</b>							
Floors, concrete or terrazzo	A	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Floors, linoleum, vinyl on concrete	A	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Floors, linoleum, vinyl on subfloor		0.02	0.04	0.05	0.05	0.10	0.05
Floors, wooden		0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Floors, wooden platform w/airspace		0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
Carpet, heavy on concrete	A	0.02	0.06	0.14	0.57	0.60	0.65
Carpet, on 40 oz (1.35 kg/sq m) pad	A	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
Indoor-outdoor carpet	A	0.01	0.05	0.10	0.20	0.45	0.65
Wood parquet in asphalt on concrete	A	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
<b>Ceilings</b>							
Acoustical coating K-13, 1"	A	0.08	0.29	0.75	0.98	0.93	0.96
1.5"	A	0.16	0.50	0.95	1.06	1.00	0.97
2"	A	0.29	0.67	1.04	1.06	1.00	0.97
Acoustical coating K-13 "fc" 1"	A	0.12	0.38	0.88	1.16	1.15	1.12
Glass-fiber roof fabric, 12 oz/yd		0.65	0.71	0.82	0.86	0.76	0.62
Glass-fiber roof fabric, 37.5 oz/yd		0.38	0.23	0.17	0.15	0.09	0.06
<b>Acoustical Tile</b>							
Standard mineral fiber, 5/8"	E400	0.68	0.76	0.60	0.65	0.82	0.76
Standard mineral fiber, 3/4"	E400	0.72	0.84	0.70	0.79	0.76	0.81
Standard mineral fiber, 1"	E400	0.76	0.84	0.72	0.89	0.85	0.81
Energy mineral fiber, 5/8"	E400	0.70	0.75	0.58	0.63	0.78	0.73
Energy mineral fiber, 3/4"	E400	0.68	0.81	0.68	0.78	0.85	0.80
Energy mineral fiber, 1"	E400	0.74	0.85	0.68	0.86	0.90	0.79
Film faced fiberglass, 1"	E400	0.56	0.63	0.69	0.83	0.71	0.55
Film faced fiberglass, 2"	E400	0.52	0.82	0.88	0.91	0.75	0.55
Film faced fiberglass, 3"	E400	0.64	0.88	1.02	0.91	0.84	0.62

Abb. 36 Absorptionsgrade gängiger Materialien<sup>159</sup>

<sup>159</sup> Vgl. Long, Marshall, Architectural Acoustics, Amsterdam et al., Elsevier Academic Press, 2006, S. 258

# MESSPROTOKOLLE

Location RI5181 UniWien Messungen 20120420 Ballons Aula unbestuht



File 1m.wav

Sample frequency 44100 Hz

Frequency band 20 to 22050 Hz

Source distance 21.8 m

Time to first arrival 64 ms

AL<sub>cons</sub> Peutz 88 8.2 %

AL<sub>cons</sub> (STI) 5 %

STI 0.64

ø(125-4000 Hz):

S/N ø 39.5 dB

Dir/Rev ø 0.2 dB

C<sub>50</sub> ø 2.4 dB

C<sub>80</sub> ø 3.6 dB

C<sub>35</sub> ø 1.4 dB

D<sub>50</sub> ø 63 %

D<sub>80</sub> ø 68 %

T<sub>Center</sub> ø 102 ms

Echograd<sub>Musik</sub> ø 0.6

Echograd<sub>Sprache</sub> ø 0.5

EDT<sub>Sch</sub> ø 2.7 s

EDT<sub>(ETC10dB ...)</sub> ø 2.3 s

T<sub>30</sub> (ETCSch) ø 3.8 s

T<sub>30</sub> (ETCsm.) ø 3.7 s

ST1 ø -3.8 dB

ST2 ø -1.6 dB

EEB ø 2.8 dB

Oct. 125Hz 250Hz 500Hz 1kHz 2kHz 4kHz 8kHz ø125-4k

C<sub>50</sub>/dB 1.4 -0.6 1 2.2 5.4 5 10.2 2.4

C<sub>80</sub>/dB 1.8 1.1 2.1 3.6 6.6 6.3 11.9 3.6

D<sub>50</sub>% 58 47 56 63 78 76 91 63

T<sub>c</sub>/ms 148 144 125 96 52 47 14 102

E<sub>kM</sub> 0.7 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6 0.6

E<sub>kS</sub> 0.7 0.7 0.5 0.5 0.5 0.5 0.4 0.6

EDT<sub>sm</sub>/s 2.18 2.25 1.74 1.69 2.17 1.05 2.2

EDT<sub>10</sub>/s 3.33 3.01 2.71 2.14 1.42 1.39 0.65 2.3

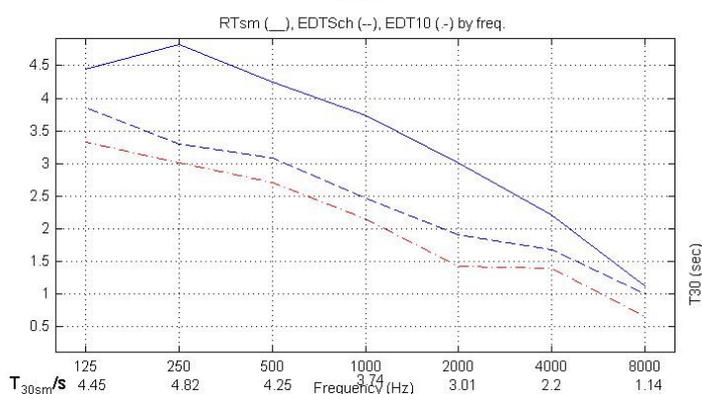
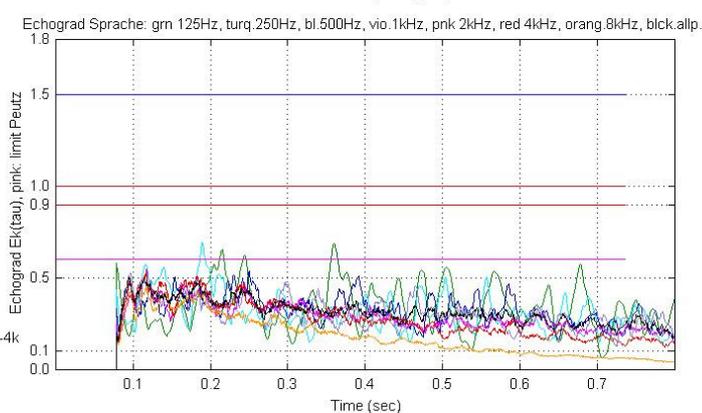
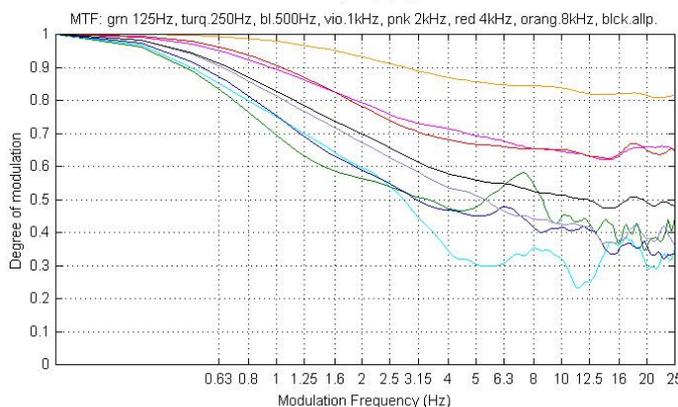
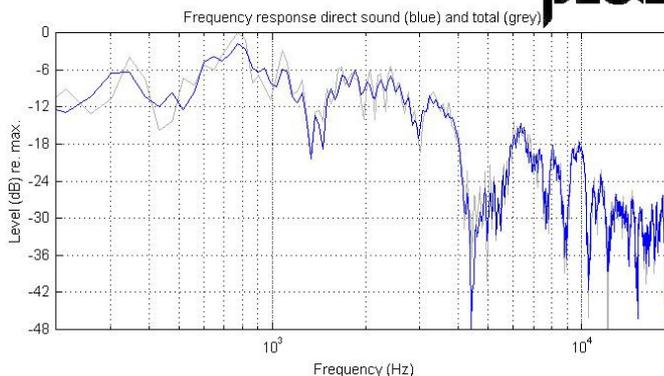
EDT<sub>sc</sub>/s 3.85 3.29 3.08 2.47 1.9 1.68 0.99 2.7

T<sub>30sm</sub>/s 4.45 4.82 4.25 3.74 3.01 2.2 1.12 3.7

BR = 1.2

(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. raci109 06-Dec-2012



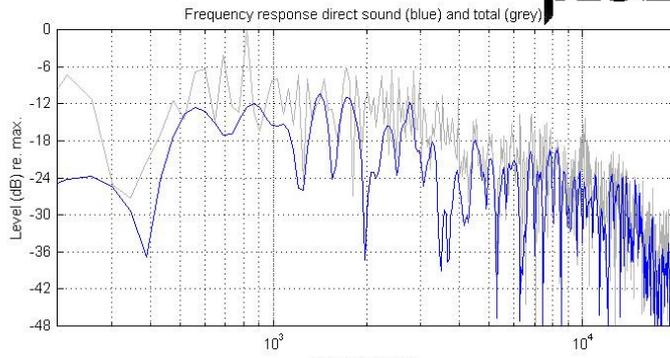
**Abb. 37** Analyse der Impulsantwort der Aula Lounge angeregt durch einen platzenden Ballon in 1m Abstand<sup>160</sup>

<sup>160</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location RI5181 UniWien Messungen 20120420 Ballons Aula unbestuhlt

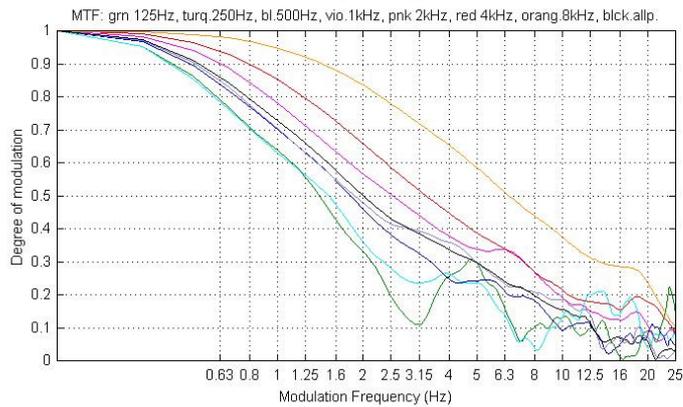


File 4m.wav  
 Sample frequency 44100 Hz  
 Frequency band 20 to 22050 Hz  
 Source distance 16.41 m  
 Time to first arrival 48 ms  
 AL<sub>cons</sub> Peutz 88 17.7 %  
 AL<sub>cons</sub> (STI) 11.3 %  
 STI 0.49

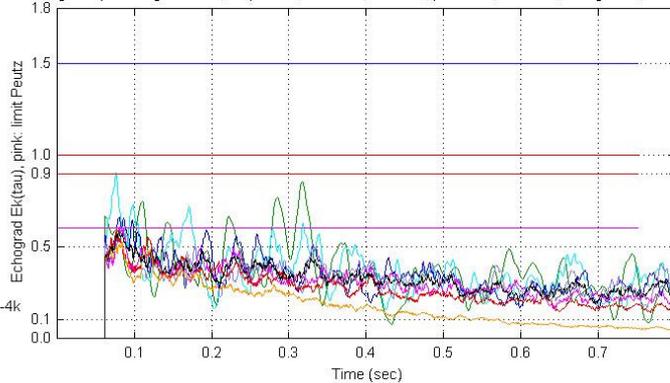


ø(125-4000 Hz):

S/N ø 39.8 dB  
 Dir/Rev ø -16.6 dB  
 C<sub>50</sub> ø -4.1 dB  
 C<sub>80</sub> ø -1.5 dB  
 C<sub>35</sub> ø -6.6 dB  
 D<sub>50</sub> ø 30 %  
 D<sub>80</sub> ø 42 %  
 T<sub>Center</sub> ø 188 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub> ø 0.6  
 Echograd<sub>Sprache</sub> ø 0.6  
 EDT<sub>Sch</sub> ø 2.9 s  
 EDT<sub>(ETC10dB ...)</sub> ø 3.1 s  
 T<sub>30</sub> (ETCSch) ø 3.8 s  
 T<sub>30</sub> (ETCSm) ø 3.7 s  
 ST1 ø 11.3 dB  
 ST2 ø 13.1 dB  
 EEB ø 12.6 dB



Echograd Sprache: gm 125Hz, turq 250Hz, bl 500Hz, vio 1kHz, pnk 2kHz, red 4kHz, orang 8kHz, blk alp.



Oct. 125Hz 250Hz 500Hz 1kHz 2kHz 4kHz 8kHz ø125-4k

C<sub>50</sub>/dB -8 -6.4 -4.8 -3.1 -1.4 -0.8 3.1 -4.1

C<sub>80</sub>/dB -4.5 -4.8 -2.3 -0.6 1 2.2 6.4 -1.5

D<sub>50</sub>% 14 19 25 33 42 46 67 30

T<sub>c</sub>/ms 257 255 202 179 132 101 49 188

E<sub>kM</sub> 0.7 0.8 0.7 0.6 0.6 0.6 0.6 0.7

E<sub>kS</sub> 0.9 0.9 0.7 0.6 0.6 0.6 0.5 0.7

EDT<sub>sm</sub>/s 3.51 3.12 2.87 2.71 2.34 1.92 1.44 2.7

EDT<sub>10</sub>/s 3.94 4.27 3.25 3.04 2.39 1.81 1.05 3.1

EDT<sub>sc</sub>/s 3.58 3.95 2.99 2.96 2.3 1.64 0.85 2.9

T<sub>30sm</sub>/s 4.37 4.58 4.22 3.78 3.03 2.31 1.29 3.7

BR = 1.1

(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. raci109 06-Dec-2012

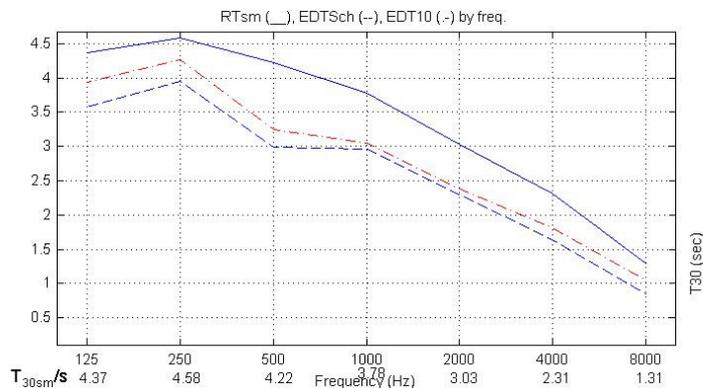


Abb. 38 Analyse der Impulsantwort der Aula Lounge angeregt durch einen platzenden Ballon in 4m Abstand<sup>161</sup>

<sup>161</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location RI5181 UniWien Messungen 20120420 Ballons Aula unbestuhlt



File 8m.wav

Sample frequency 44100 Hz

Frequency band 20 to 22050 Hz

Source distance 23.51 m

Time to first arrival 69 ms

AL<sub>cons</sub> Peutz 88 21.8 %

AL<sub>cons</sub> (STI) 16 %

STI 0.43

ø(125-4000 Hz):

S/N ø 40.2 dB

Dir/Rev ø -19.8 dB

C<sub>50</sub> ø -6.2 dB

C<sub>80</sub> ø -3.8 dB

C<sub>35</sub> ø -7.8 dB

D<sub>50</sub> ø 21 %

D<sub>80</sub> ø 30 %

T<sub>Center</sub> ø 239 ms

Echograd<sub>Musik</sub> ø 0.7

Echograd<sub>Sprache</sub> ø 0.7

EDT<sub>Sch</sub> ø 3.5 s

EDT<sub>(ETC10dB ...)</sub> ø 3.9 s

T<sub>30</sub> (ETCSch) ø 3.8 s

T<sub>30</sub> (ETCsm) ø --- 3.8 s

ST1 ø 12.2 dB

ST2 ø 14.7 dB

EEB ø 14.6 dB

Oct. 125Hz 250Hz 500Hz 1kHz 2kHz 4kHz 8kHz ø125-4k

C<sub>50</sub>/dB -8.7 -7 -8.2 -6.1 -5.3 -1.7 2.5 -6.2

C<sub>80</sub>/dB -5 -5 -6.3 -4.5 -2.2 0.2 4.6 -3.8

D<sub>50</sub>/% 12 17 13 20 23 40 64 21

T<sub>c</sub>/ms 290 299 287 252 182 124 61 239

E<sub>kM</sub> 0.8 0.8 0.7 0.7 0.6 0.6 0.6 0.7

E<sub>kS</sub> 0.8 0.8 0.7 0.7 0.6 0.6 0.6 0.7

EDT<sub>sm</sub>/s 4.61 5 5.11 3.72 3.12 2.38 1.65 4

EDT<sub>10</sub>/s 4.84 4.9 4.28 4.13 3.04 2.26 1.36 3.9

EDT<sub>50</sub>/s 4.32 4.5 3.8 3.67 2.63 1.95 1.05 3.5

T<sub>30sm</sub>/s 4.35 4.91 4.28 3.96 3.11 2.37 1.22 3.8

BR = 1.1

(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. rac109 06-Dec-2012

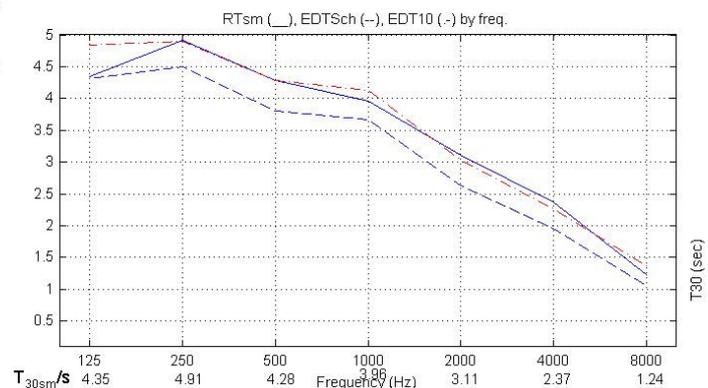
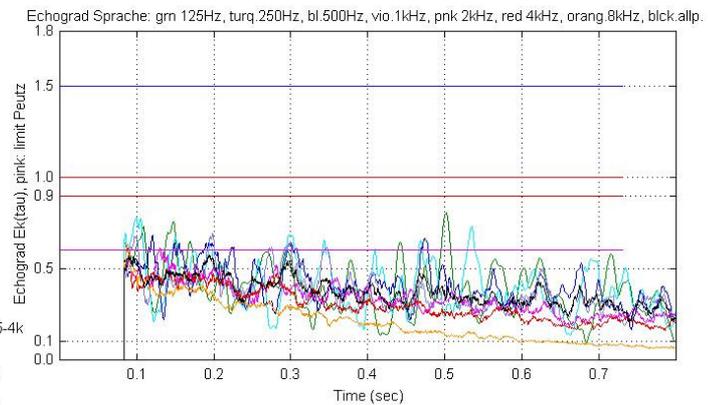
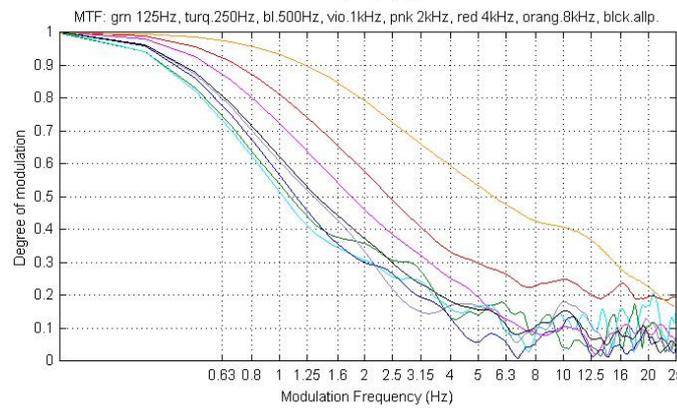
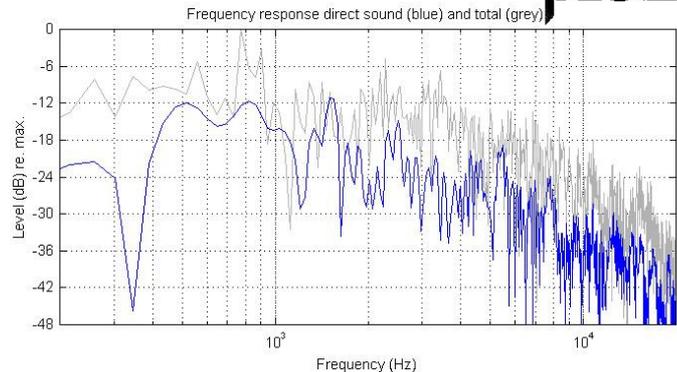


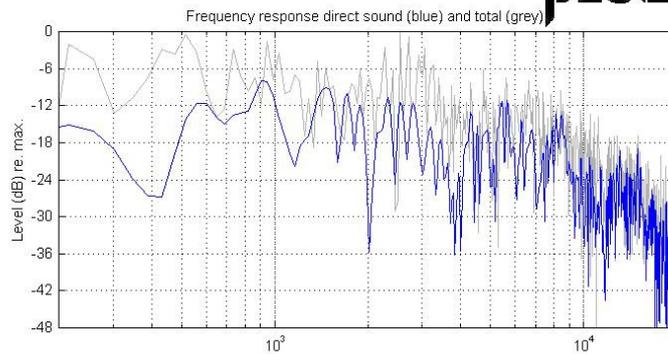
Abb. 39 Analyse der Impulsantwort der Aula Lounge angeregt durch einen platzenden Ballon in 8m Abstand<sup>162</sup>

<sup>162</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location RI5181 UniWien Messungen 20120420 Ballons Aula unbestuhlt

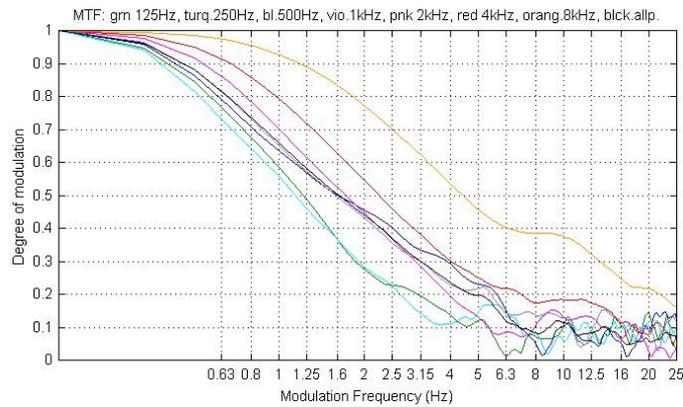


File 10m.wav  
 Sample frequency 44100 Hz  
 Frequency band 20 to 22050 Hz  
 Source distance 16.1 m  
 Time to first arrival 47 ms  
 AL<sub>cons</sub> Peutz 88 24.5 %  
 AL<sub>cons</sub> (STI) 15.8 %  
 STI 0.43

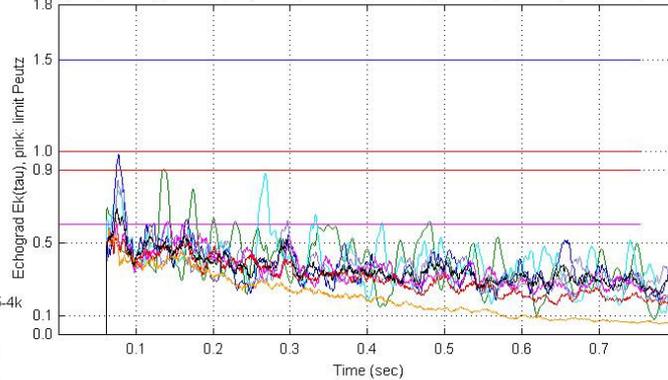


ø(125-4000 Hz):

S/N ø 39.7 dB  
 Dir/Rev ø -21.5 dB  
 C<sub>50</sub> ø -6.7 dB  
 C<sub>80</sub> ø -4.2 dB  
 C<sub>35</sub> ø -8.2 dB  
 D<sub>50</sub> ø 19 %  
 D<sub>80</sub> ø 29 %  
 T<sub>Center</sub> ø 234 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub> ø 0.8  
 Echograd<sub>Sprache</sub> ø 0.8  
 EDT<sub>Sch</sub> ø 3.5 s  
 EDT<sub>(ETC10dB ...)</sub> ø 3.8 s  
 T<sub>30</sub> (ETCSch) ø 4 s  
 T<sub>30</sub> (ETCSm) ø 3.9 s  
 ST1 ø 14.2 dB  
 ST2 ø 16.7 dB  
 EEB ø 16.8 dB



Echograd Sprache: gm 125Hz, turq 250Hz, bl 500Hz, vio 1kHz, pnk 2kHz, red 4kHz, orang 8kHz, blk allp.



Oct. 125Hz 250Hz 500Hz 1kHz 2kHz 4kHz 8kHz ø125-4k

C<sub>50</sub>/dB -9.2 -8.9 -7.6 -5.8 -5.6 -2.8 1.7 -6.7

C<sub>80</sub>/dB -7.6 -6.2 -4.1 -3.1 -3.7 -0.7 3.8 -4.2

D<sub>50</sub>% 11 11 15 21 22 35 60 19

T<sub>c</sub>/ms 291 311 241 224 197 138 65 234

E<sub>kM</sub> 0.9 0.8 1 0.8 0.6 0.5 0.6 0.8

E<sub>kS</sub> 0.9 0.9 1 0.8 0.6 0.5 0.6 0.8

EDT<sub>sm</sub>/s 4.03 3.93 3.29 3.27 3.17 2.6 1.85 3.4

EDT<sub>10</sub>/s 4.43 5.04 4 3.77 3.15 2.3 1.25 3.8

EDT<sub>sc</sub>/s 3.9 4.58 3.92 3.53 2.8 2.05 1.03 3.5

T<sub>30sm</sub>/s 4.52 4.97 4.41 4.11 3.16 2.46 1.21 3.9

BR = 1.1

(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. raci109 06-Dec-2012

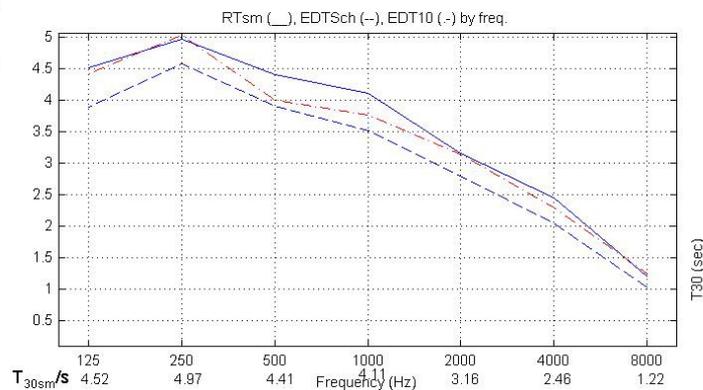


Abb. 40 Analyse der Impulsantwort der Aula Lounge angeregt durch einen platzenden Ballon in 10m Abstand<sup>163</sup>

<sup>163</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location RI5181 UniWien Messungen 20120420 Ballons Aula unbestuhlt



File 16m.wav

Sample frequency 44100 Hz

Frequency band 20 to 22050 Hz

Source distance 18.81 m

Time to first arrival 55 ms

AL<sub>cons</sub> Peutz 88 24.6 %

AL<sub>cons</sub> (STI) 19.3 %

STI 0.39

ø(125-4000 Hz):

S/N ø 38.9 dB

Dir/Rev ø -21.5 dB

C<sub>50</sub> ø -8.2 dB

C<sub>80</sub> ø -5.4 dB

C<sub>35</sub> ø -10.3 dB

D<sub>50</sub> ø 15 %

D<sub>80</sub> ø 24 %

T<sub>Center</sub> ø 290 ms

Echograd<sub>Musik</sub> ø 0.7

Echograd<sub>Sprache</sub> ø 0.7

EDT<sub>Sch</sub> ø 4.1 s

EDT<sub>(ETC10dB ...)</sub> ø 4.5 s

T<sub>30</sub> (ETCSch) ø 4.1 s

T<sub>30</sub> (ETCsm) ø 4.1 s

ST1 ø 12.4 dB

ST2 ø 15.4 dB

EEB ø 16.3 dB

Oct. 125Hz 250Hz 500Hz 1kHz 2kHz 4kHz 8kHz ø125-4k

C<sub>50</sub>/dB -10.8-8.6 -11.9 -9.2 -5.8 -3.1 3.7 -8.2

C<sub>80</sub>/dB -7.2 -5.6 -7.5 -7.2 -4.1 -0.9 5.7 -5.4

D<sub>50</sub>% 8 12 6 11 21 33 70 15

T<sub>c</sub>/ms 346 339 342 319 237 158 52 290

E<sub>kM</sub> 0.8 0.8 0.8 0.7 0.6 0.6 0.6 0.7

E<sub>kS</sub> 0.9 0.8 0.8 0.7 0.6 0.6 0.5 0.7

EDT<sub>sm</sub>/s 5.39 5.29 4.99 5.17 4.23 2.78 1.53 4.6

EDT<sub>10</sub>/s 5.31 5.52 5.1 4.79 3.67 2.78 1.28 4.5

EDT<sub>sc</sub>/s 4.8 5.26 4.39 4.24 3.27 2.57 1.25 4.1

T<sub>30sm</sub>/s 4.81 5.11 4.54 4.11 3.28 2.55 1.37 4.1

BR = 1.1

(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. raci109 06-Dec-2012

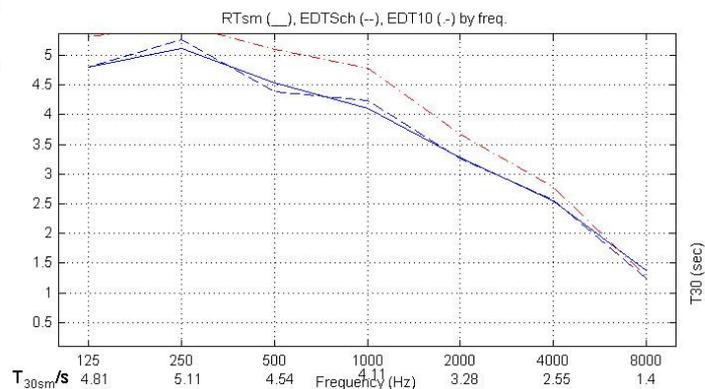
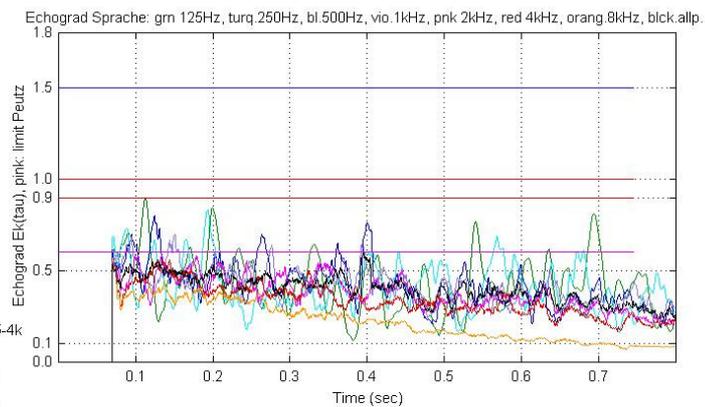
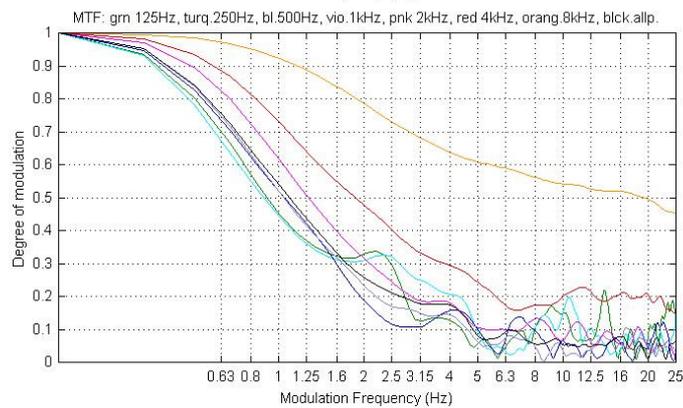
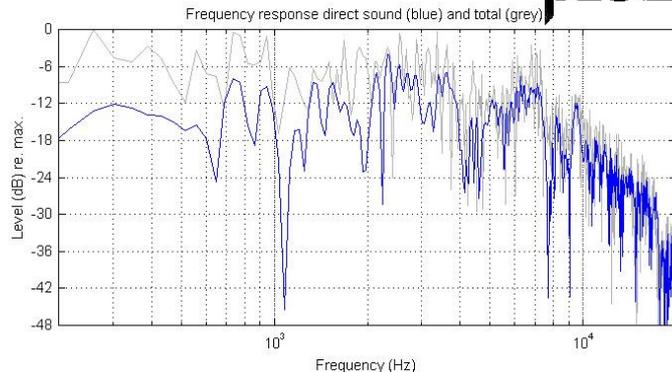


Abb. 41 Analyse der Impulsantwort der Aula Lounge angeregt durch einen platzenden Ballon in 16m Abstand<sup>164</sup>

<sup>164</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location Messungen 20120420 Aula PA

File AulaPA1unbes.wmb

Sample frequency 44100 Hz

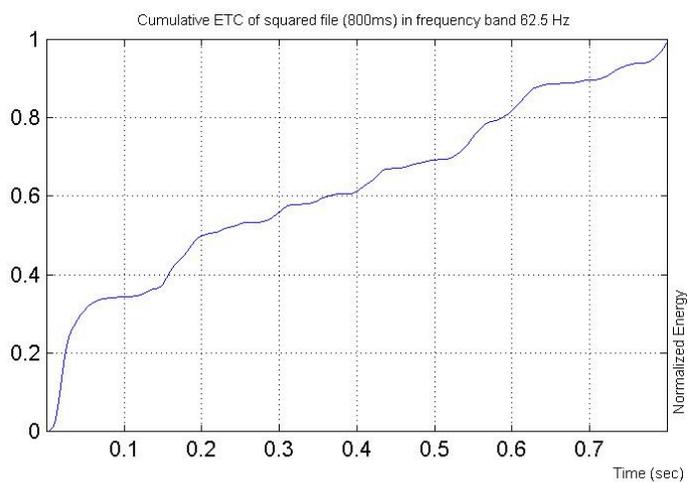
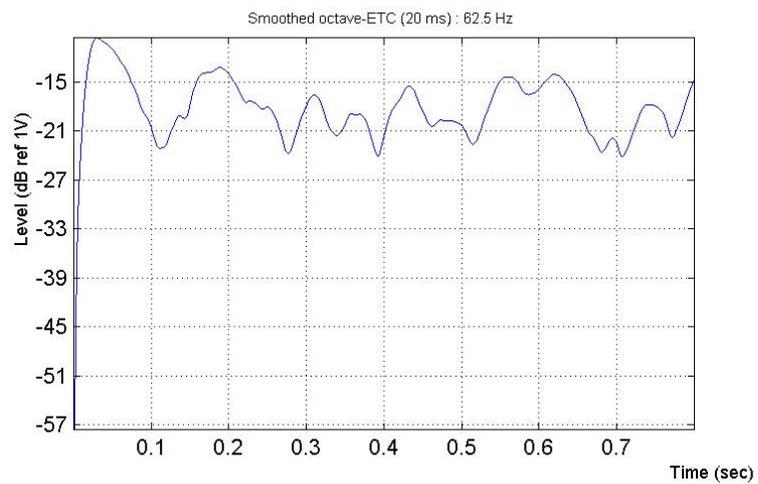
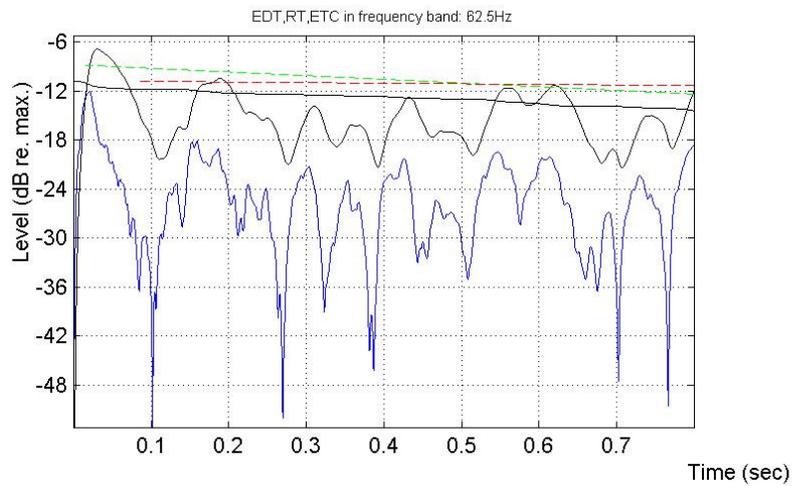
Frequency band 62.5 Hz

Source distance not calculated

Time to first arrival not calculated

Parameters:

S/N 18.8 dB  
Dir/Rev -18.2 dB  
C<sub>50</sub> -9.4 dB  
C<sub>80</sub> -9 dB  
C<sub>5-80</sub> -9.1 dB  
D<sub>50</sub> 10 %  
D<sub>80</sub> 11 %  
T<sub>Center</sub> 654 ms  
Echograd<sub>Musik</sub> 1  
Echograd<sub>Sprache</sub> 1.3  
EDT<sub>Sch</sub> 15.34 s  
EDT<sub>(ETC10dB)</sub> 5.97 s  
T<sub>30</sub> (ETCL50) 112.1 s  
T<sub>30</sub> (ETCsm) --- 83.08 s  
ST1 7.7 dB  
ST2 10.4 dB  
EEB 16.4 dB



(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. raci108 14-May-2012

Abb. 42 Analyse des Oktavbandes bei 62,5 Hz in 1m Abstand<sup>165</sup>

<sup>165</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location Messungen 20120420 Aula PA

File AulaPA1unbes.wmb

Sample frequency 44100 Hz

Frequency band 125 Hz

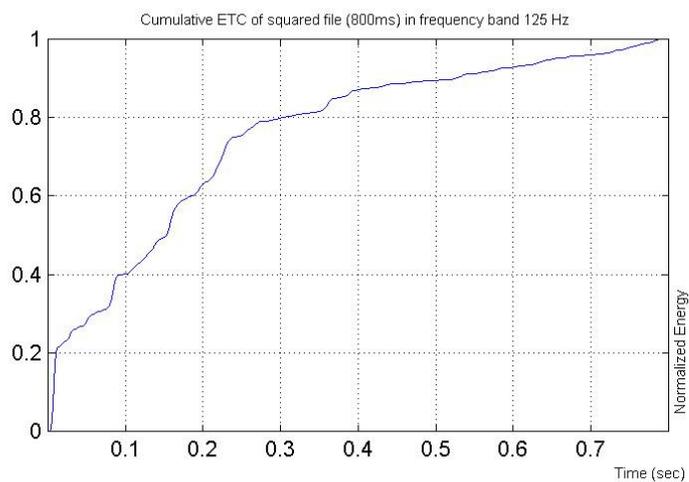
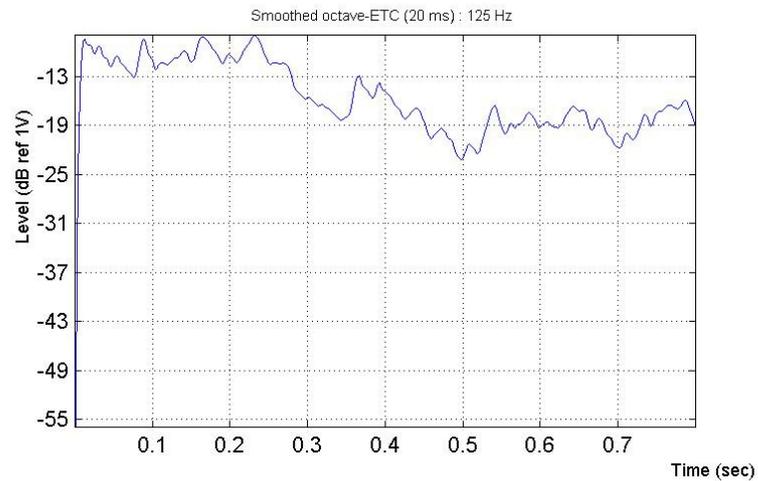
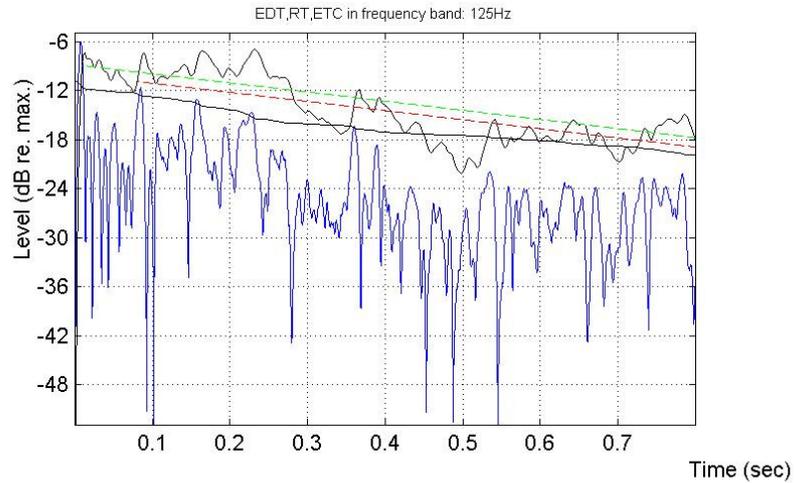


Source distance not calculated

Time to first arrival not calculated

Parameters:

S/N	15.4 dB
Dir/Rev	-7.6 dB
C <sub>50</sub>	-4.9 dB
C <sub>80</sub>	-4 dB
C <sub>s<sup>-</sup>80</sub>	-4.9 dB
D <sub>50</sub>	24 %
D <sub>80</sub>	28 %
T <sub>Center</sub>	260 ms
Echograd <sub>Musik</sub>	0.9
Echograd <sub>Sprache</sub>	0.9
EDT <sub>Sch</sub>	6.34 s
EDT <sub>(ETC10dB)</sub>	5.43 s
T <sub>30 (ETCLSQ)</sub>	5.36 s
T <sub>30 (ETCsm)</sub>	5.39 s
ST1	-0.8 dB
ST2	2.9 dB
EEB	6.2 dB



(c) 2001-2010 Peutz

IR-eval. prg. vers. rac108 14-May-2012

Abb. 43 Analyse des Frequenzbandes um 125 Hz in 1m Abstand<sup>166</sup>

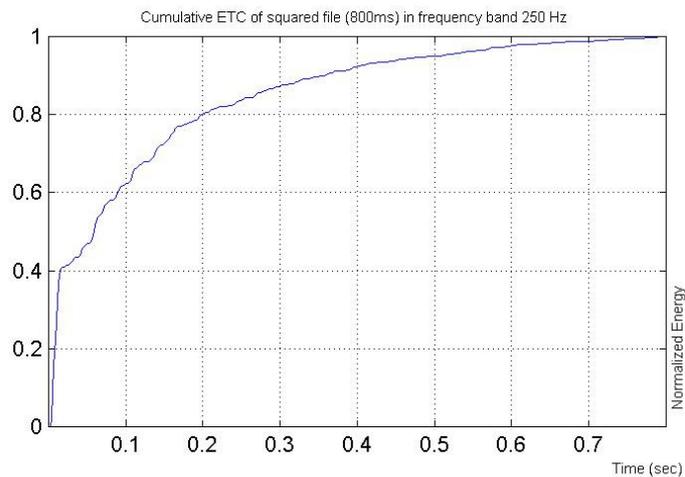
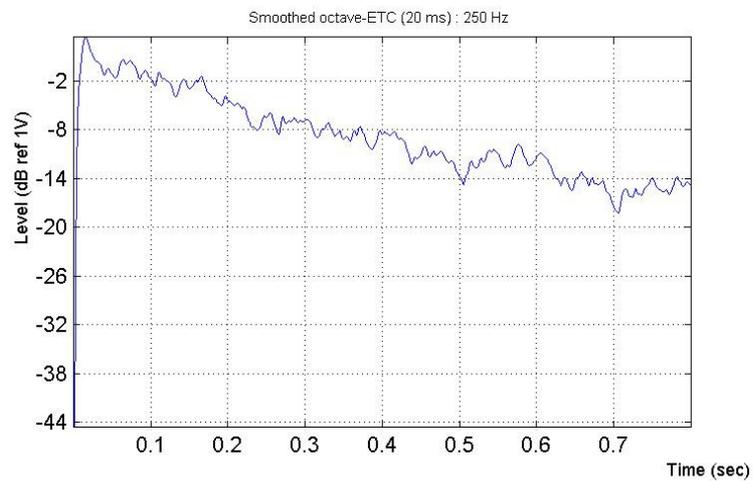
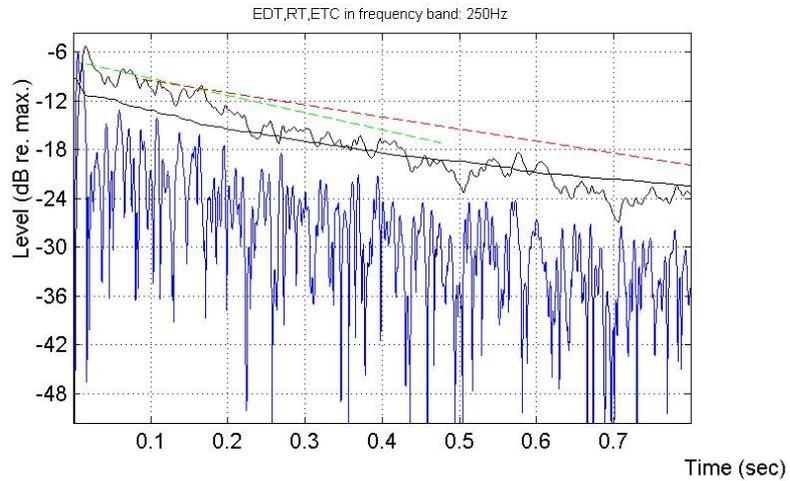
<sup>166</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA1unbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     250 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                22 dB  
 Dir/Rev           -4.4 dB  
 C<sub>50</sub>               -1 dB  
 C<sub>80</sub>               0.9 dB  
 C<sub>5-80</sub>            -0.3 dB  
 D<sub>50</sub>               44 %  
 D<sub>80</sub>               55 %  
 T<sub>Center</sub>          155 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    0.7  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 0.6  
 EDT<sub>Sch</sub>           3.35 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>   2.86 s  
 T<sub>30</sub> (ETCLSQ)    4.15 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm)     4.03 s  
 ST1               -1.6 dB  
 ST2               1.1 dB  
 EEB               4.9 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

Abb. 44 Analyse des Frequenzbandes um 250 Hz in 1m Abstand<sup>167</sup>

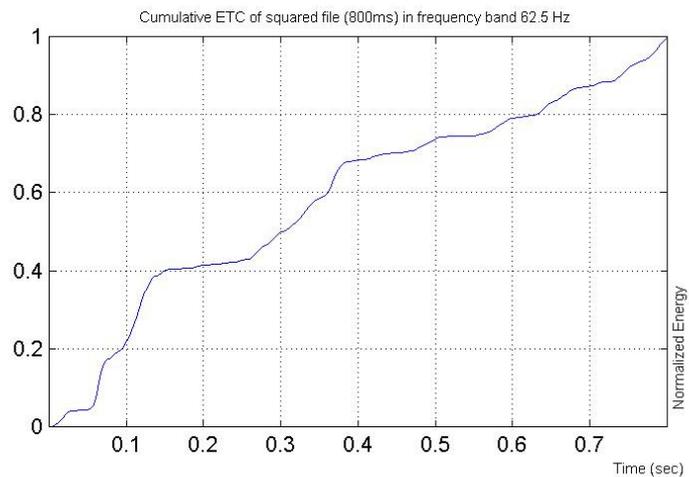
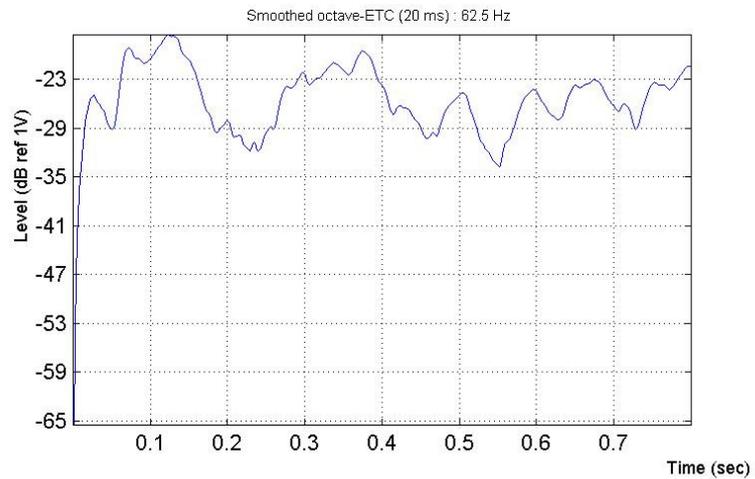
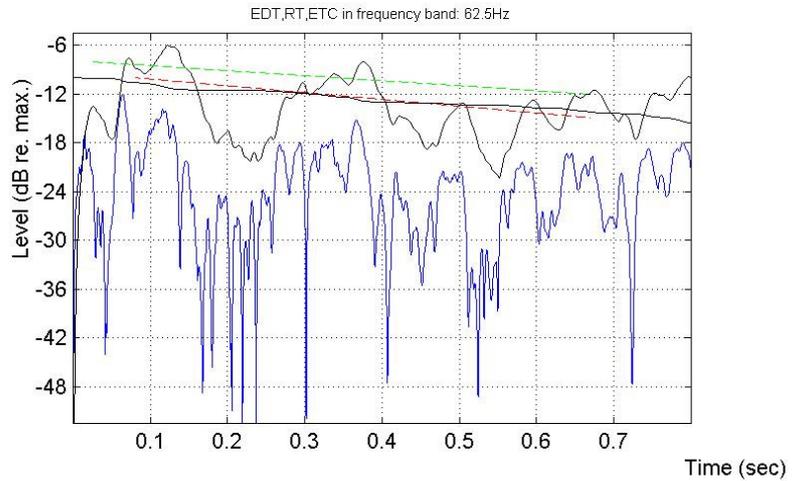
<sup>167</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA4m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     62.5 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                25.4 dB  
 Dir/Rev           -22.3 dB  
 C<sub>50</sub>               -20.8 dB  
 C<sub>80</sub>               -14.6 dB  
 C<sub>5-80</sub>            -14.6 dB  
 D<sub>50</sub>               1 %  
 D<sub>80</sub>               3 %  
 T<sub>Center</sub>          660 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    1.1  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 1.4  
 EDT<sub>Sch</sub>          10.09 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>    3.98 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)    12.88 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm.)    7.2 s  
 ST1               13.6 dB  
 ST2               16.6 dB  
 EEB               12.4 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

**Abb. 45** Analyse des Frequenzbandes um 62,5 Hz in 4m Abstand<sup>168</sup>

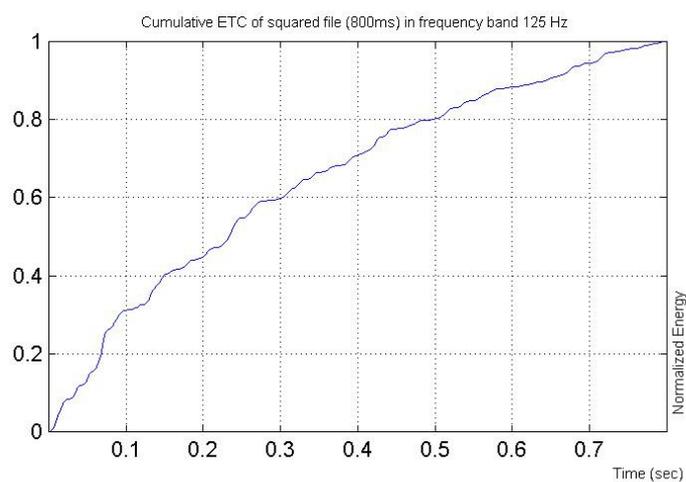
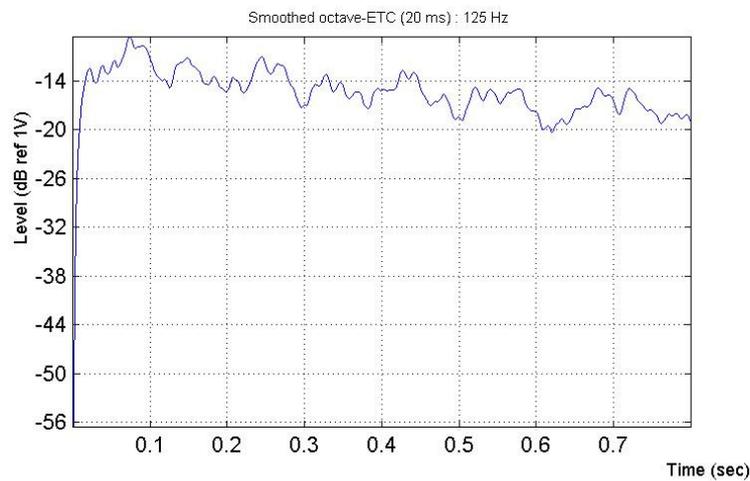
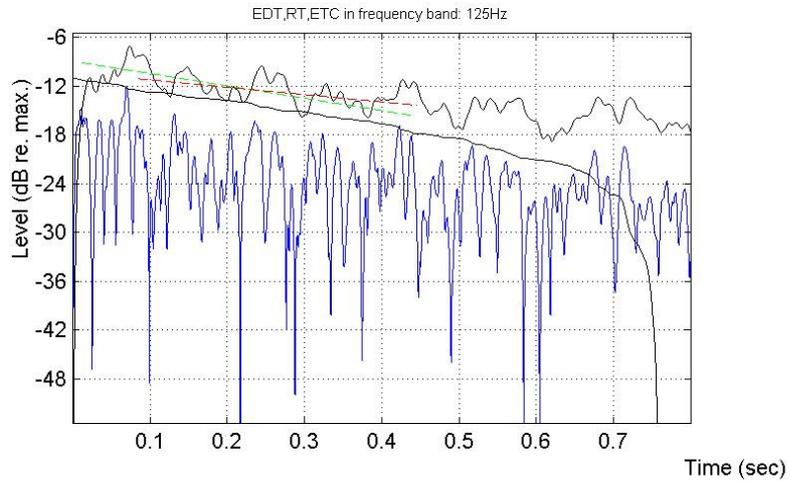
<sup>168</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA4m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     125 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                14 dB  
 Dir/Rev           -14.9 dB  
 C<sub>50</sub>              -9.1 dB  
 C<sub>80</sub>              -6 dB  
 C<sub>5-80</sub>           -6.2 dB  
 D<sub>50</sub>              11 %  
 D<sub>80</sub>              20 %  
 T<sub>Center</sub>        387 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>   0.8  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 0.8  
 EDT<sub>Sch</sub>        4.34 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>   2.65 s  
 T<sub>30</sub> (ETCLSQ)   12.68 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm)    6.68 s  
 ST1              7.7 dB  
 ST2              9.7 dB  
 EEB              9.7 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

**Abb. 46** Analyse des Frequenzbandes um 125 Hz in 4m Abstand<sup>169</sup>

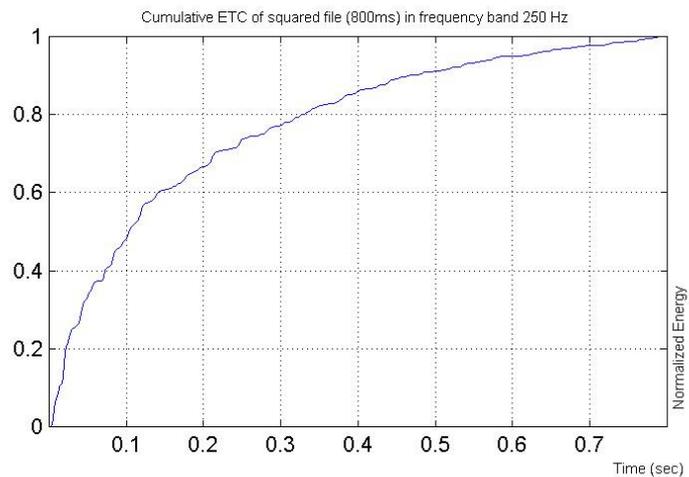
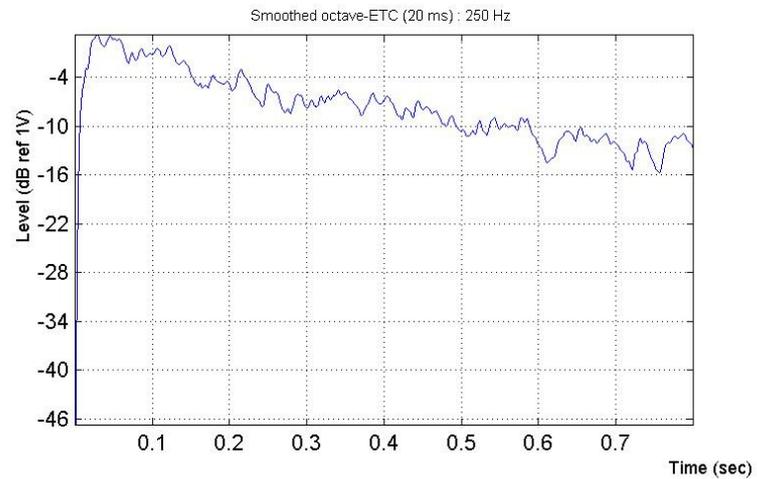
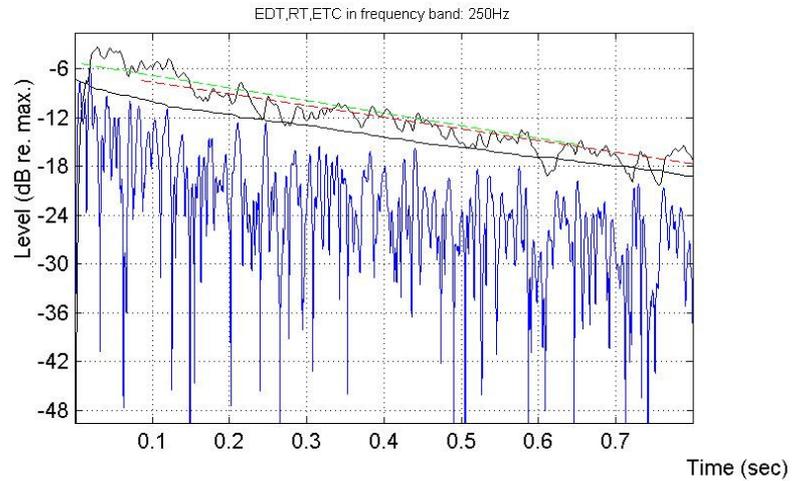
<sup>169</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA4m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     250 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                11.1 dB  
 Dir/Rev           -10.3 dB  
 C<sub>50</sub>               -3.4 dB  
 C<sub>80</sub>               -2 dB  
 C<sub>5-80</sub>             -2.4 dB  
 D<sub>50</sub>               31 %  
 D<sub>80</sub>               39 %  
 T<sub>Center</sub>          227 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    0.6  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 0.6  
 EDT<sub>Sch</sub>           4.25 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>   3.92 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)    4.26 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm) ---- 4.17 s  
 ST1               5.4 dB  
 ST2               7.4 dB  
 EEB               8 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

**Abb. 47** Analyse des Frequenzbandes um 250 Hz in 4m Abstand<sup>170</sup>

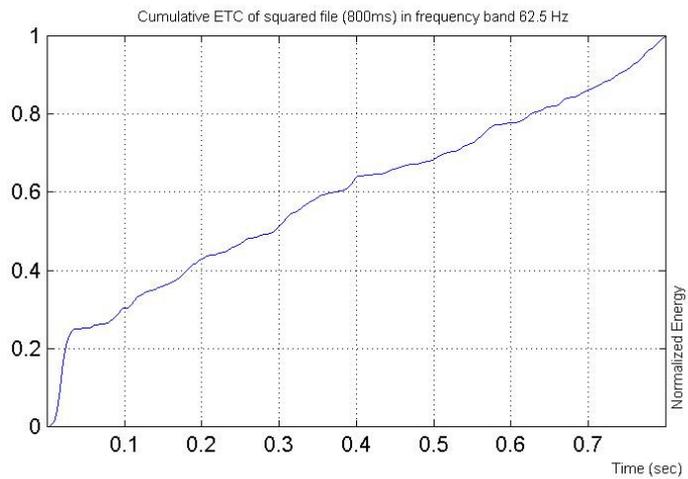
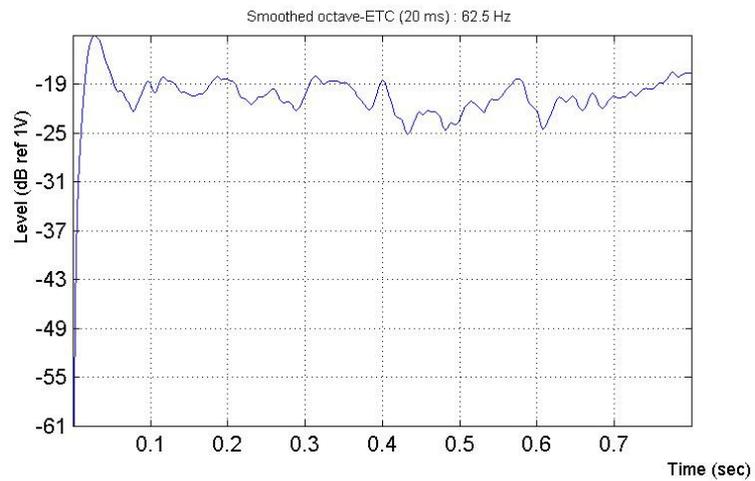
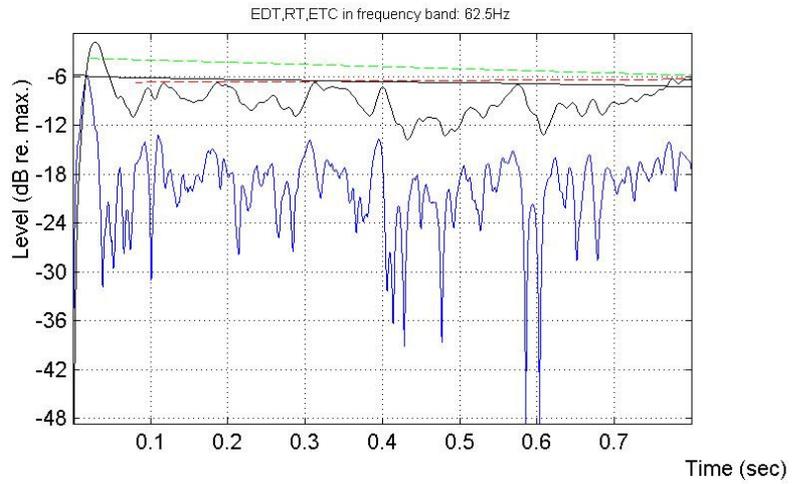
<sup>170</sup> Mit Freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA8m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     62.5 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                17.1 dB  
 Dir/Rev           -22.1 dB  
 C<sub>50</sub>              -11.3 dB  
 C<sub>80</sub>              -11 dB  
 C<sub>5-80</sub>           -11.1 dB  
 D<sub>50</sub>              7 %  
 D<sub>80</sub>              7 %  
 T<sub>Center</sub>        732 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>   0.9  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 1.2  
 EDT<sub>Sch</sub>        24.15 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub> 10.97 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)   150 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm.) --- 110.36 s  
 ST1              6.5 dB  
 ST2              9.5 dB  
 EEB              16 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval. prg. vers. raci108 14-May-2012

**Abb. 48** Analyse des Frequenzbandes um 62,5 Hz im Abstand von 8m<sup>171</sup>

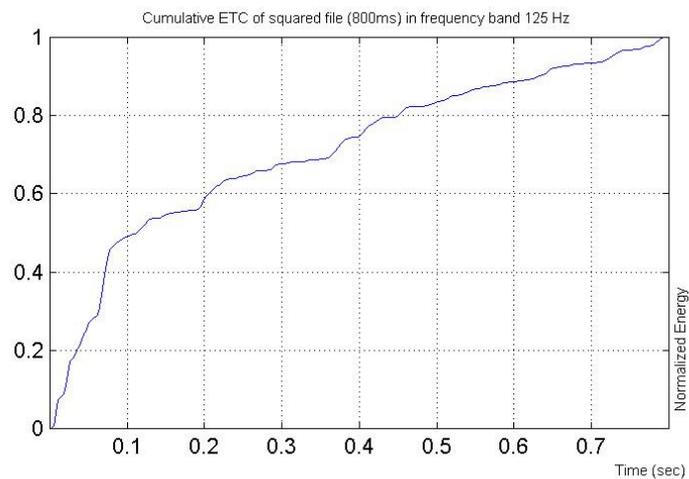
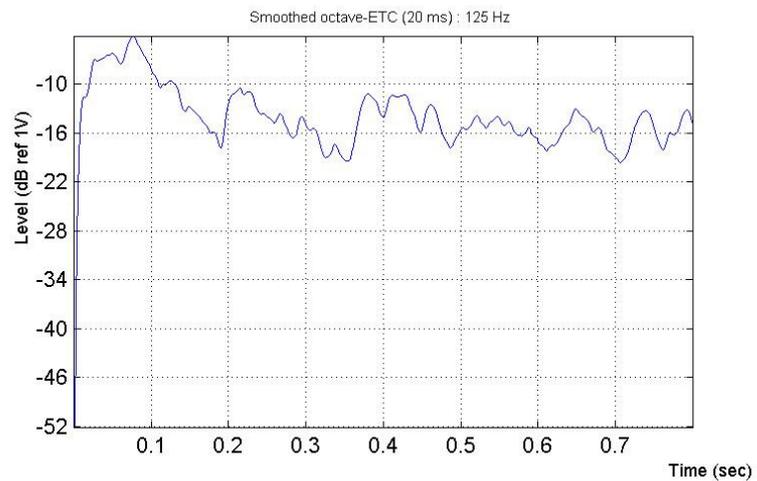
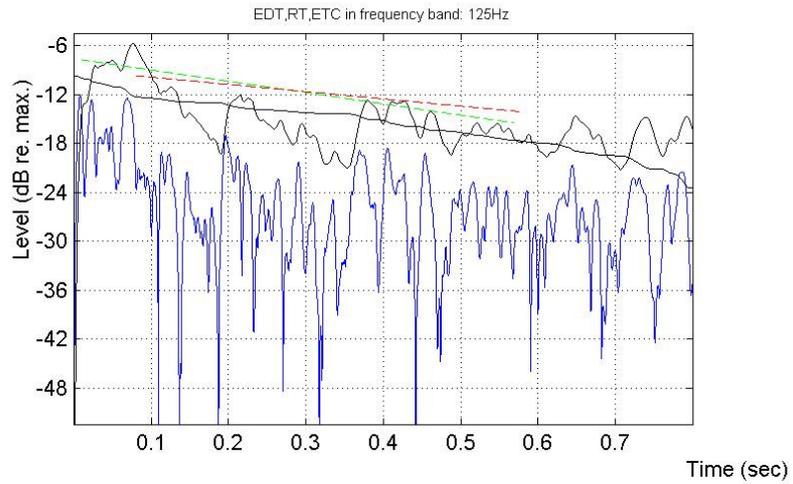
<sup>171</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA8m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     125 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                16.9 dB  
 Dir/Rev           -11 dB  
 C<sub>50</sub>               -7 dB  
 C<sub>80</sub>               -4.1 dB  
 C<sub>5-80</sub>             -4.2 dB  
 D<sub>50</sub>               17 %  
 D<sub>80</sub>               28 %  
 T<sub>Center</sub>          361 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    0.9  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 1.1  
  
 EDT<sub>Sch</sub>          5.09 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>    3.42 s  
 T<sub>30</sub> (ETCLSQ)    15.53 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm) ---- 6.76 s  
  
 ST1               6.9 dB  
 ST2               7.9 dB  
 EEB               10.1 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg. vers. raci108 14-May-2012

**Abb. 49** Analyse des Frequenzbandes um 125 Hz in 8m Abstand<sup>172</sup>

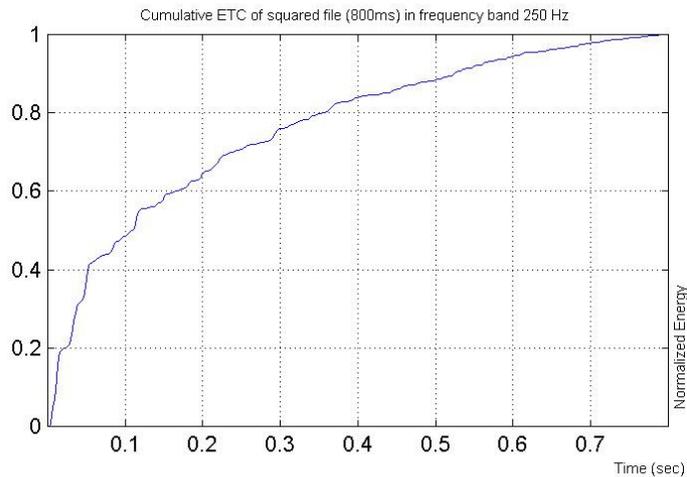
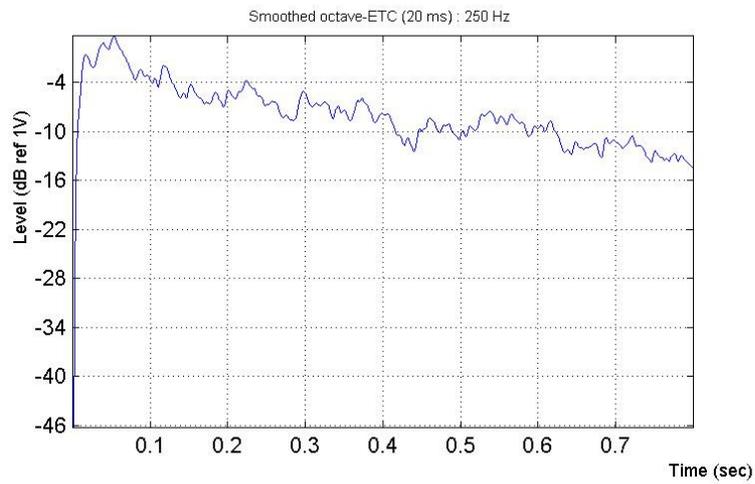
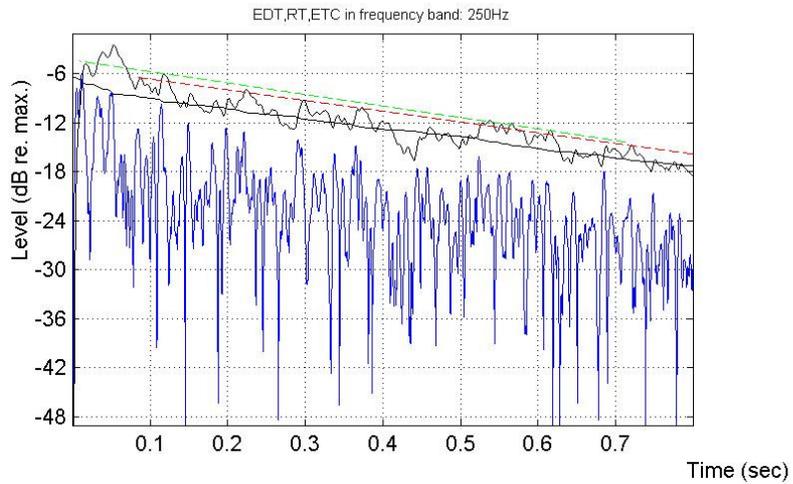
<sup>172</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location           Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA8m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     250 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                18.4 dB  
 Dir/Rev           -10.2 dB  
 C<sub>50</sub>               -2.7 dB  
 C<sub>80</sub>               -1.9 dB  
 C<sub>5-80</sub>             -2.4 dB  
 D<sub>50</sub>               35 %  
 D<sub>80</sub>               39 %  
 T<sub>Center</sub>           244 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>     0.7  
 Echograd<sub>Sprache</sub>   0.7  
 EDT<sub>Sch</sub>           4.84 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>    4.3 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)    4.48 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm)     4.57 s  
 ST1               4 dB  
 ST2               5.9 dB  
 EEB               8 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval. prg. vers. raci108 14-May-2012

**Abb. 50** Analyse des Frequenzbandes um 250 Hz in 8m Abstand<sup>173</sup>

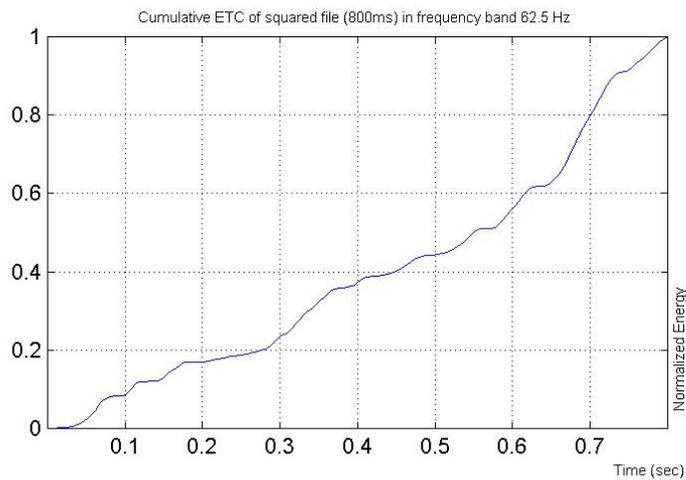
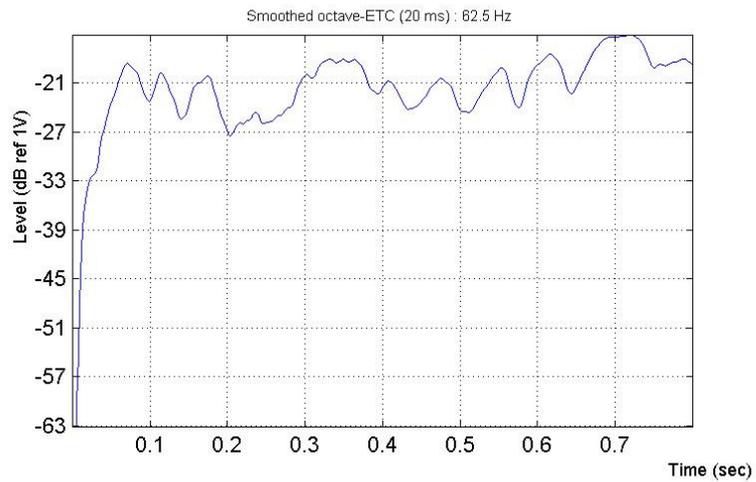
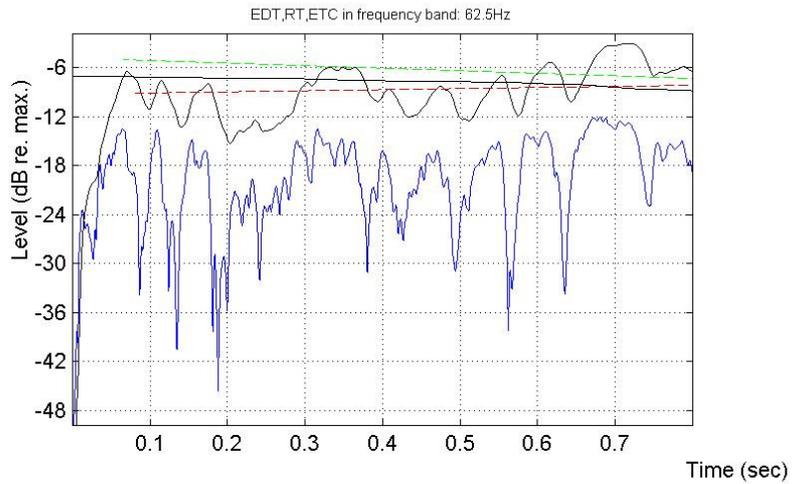
<sup>173</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik-Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA12m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     62.5 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                46.2 dB  
 Dir/Rev           -44.2 dB  
 C<sub>50</sub>               -21.4 dB  
 C<sub>80</sub>               -16.1 dB  
 C<sub>5-80</sub>             -16.1 dB  
 D<sub>50</sub>               1 %  
 D<sub>80</sub>               2 %  
 T<sub>Center</sub>           832 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    0.9  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 1.1  
 EDT<sub>Sch</sub>           19.39 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>    9.86 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)    37.95 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm)     44.73 s  
 ST1               21.4 dB  
 ST2               24.4 dB  
 EEB               25.8 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

**Abb. 51** Analyse des Frequenzbandes um 62,5 Hz in 12m Abstand<sup>174</sup>

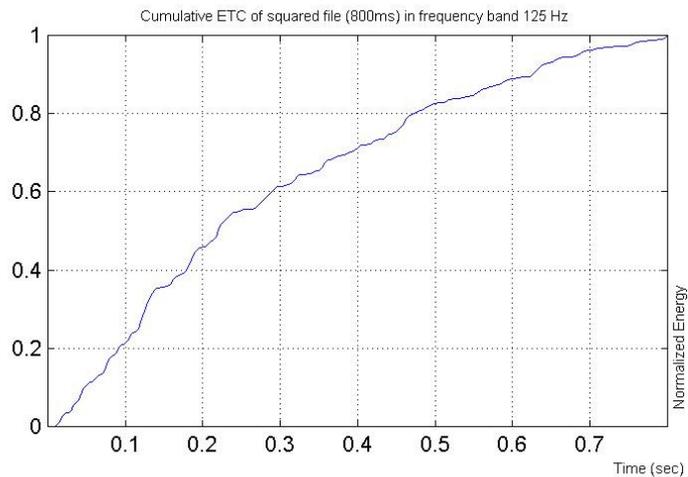
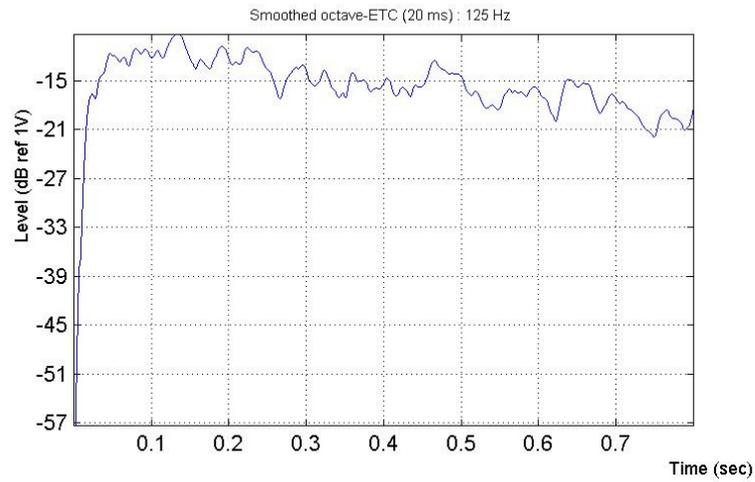
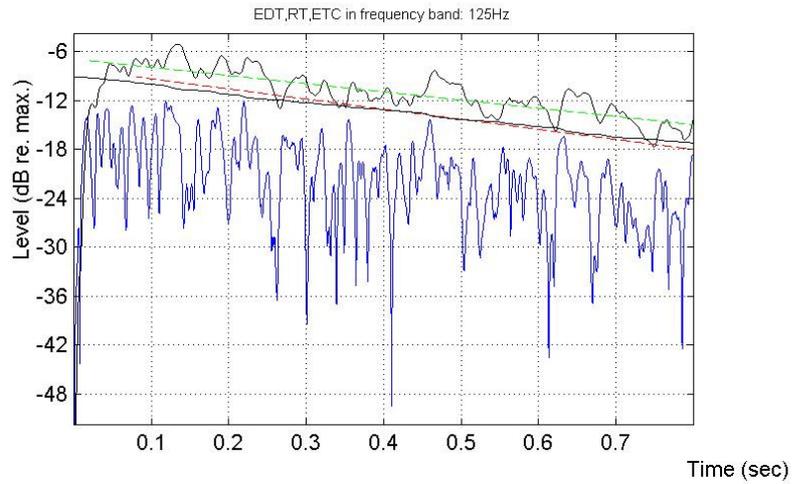
<sup>174</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location           Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA12m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     125 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                34.4 dB  
 Dir/Rev           -32.7 dB  
 C<sub>50</sub>             -10.2 dB  
 C<sub>80</sub>             -7.7 dB  
 C<sub>5-80</sub>           -7.7 dB  
 D<sub>50</sub>             9 %  
 D<sub>80</sub>             15 %  
 T<sub>Center</sub>         359 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>   0.8  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 0.9  
 EDT<sub>Sch</sub>         5.8 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>   6.01 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)   4.74 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm)    4.83 s  
 ST1               18.7 dB  
 ST2               22.4 dB  
 EEB               22.2 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval. prg. vers. raci108 14-May-2012

**Abb. 52** Analyse des Frequenzbandes um 125 Hz in 12m Abstand<sup>175</sup>

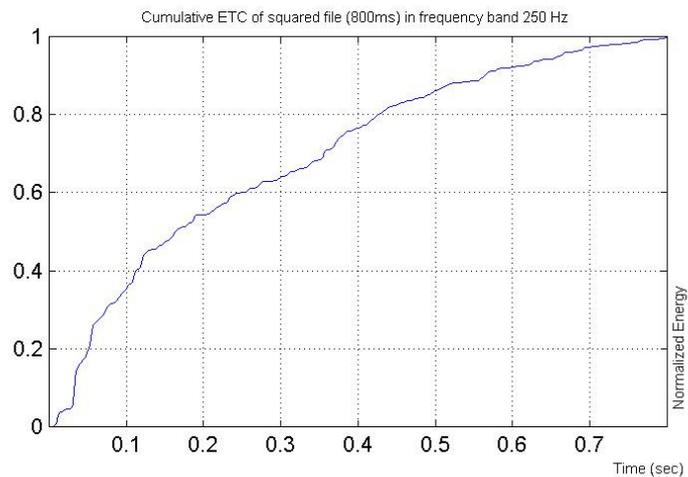
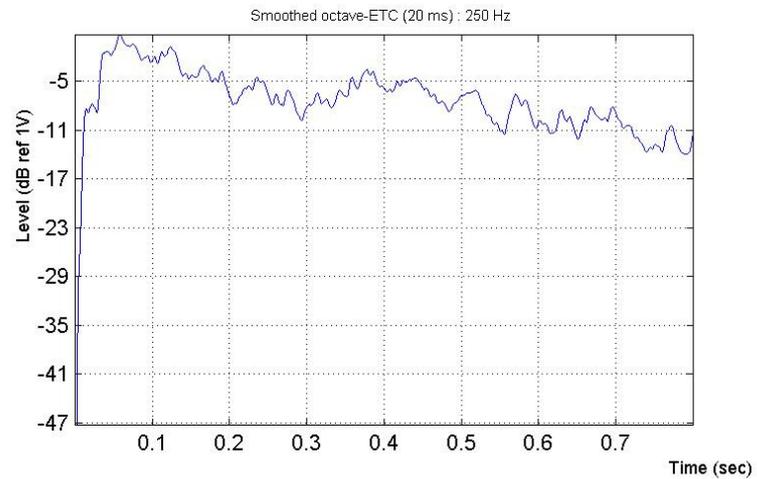
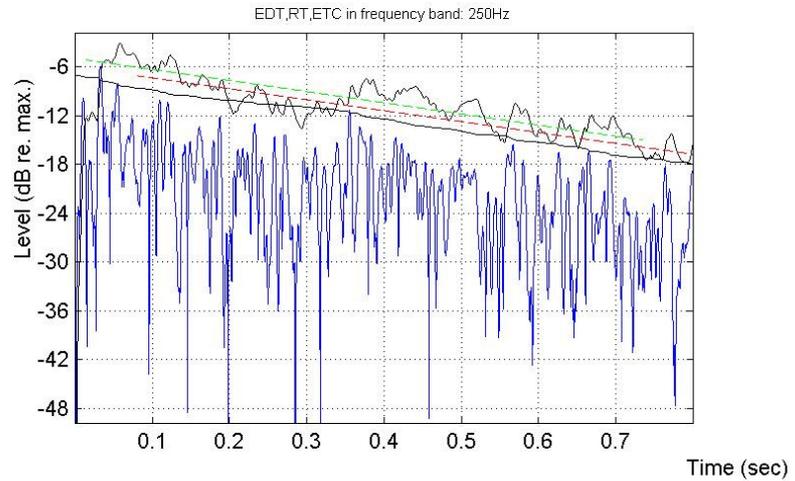
<sup>175</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

Location            Messungen 20120420 Aula PA  
 File                AulaPA12m\_nbes.wmb  
 Sample frequency   44100 Hz  
 Frequency band     250 Hz



Source distance not calculated  
 Time to first arrival not calculated  
 Parameters:

S/N                31 dB  
 Dir/Rev           -22.8 dB  
 C<sub>50</sub>               -6.5 dB  
 C<sub>80</sub>               -3.9 dB  
 C<sub>5-80</sub>             -3.9 dB  
 D<sub>50</sub>               18 %  
 D<sub>80</sub>               29 %  
 T<sub>Center</sub>           291 ms  
 Echograd<sub>Musik</sub>    0.9  
 Echograd<sub>Sprache</sub> 0.9  
 EDT<sub>Sch</sub>           4.53 s  
 EDT<sub>(ETC10dB)</sub>   4.41 s  
 T<sub>30</sub> (ETCL90)    4.5 s  
 T<sub>30</sub> (ETCsm.)    4.48 s  
 ST1               10.8 dB  
 ST2               12.7 dB  
 EEB               20.9 dB



(c) 2001-2010 Peutz  
 IR-eval\_prg\_vers\_raci108 14-May-2012

**Abb. 53** Analyse des Frequenzbandes um 250 Hz in 12m Abstand<sup>176</sup>

<sup>176</sup> Mit freundlicher Genehmigung von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz

## ABSTRACT

Die Messungen der raumakustischen Parameter in der Aula Lounge, einem multifunktionalen Veranstaltungssaal für bis zu 120 Personen in der Aula der Wissenschaften, Wollzeile 27A, 1010 Wien, wurden im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚Praktische Einführung in die raumakustische Messtechnik und Analyse‘ im Sommersemester 2012 am Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien durchgeführt. Das erforderliche Equipment wurde vom Institut für Musikwissenschaft und von Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz zur Verfügung gestellt. Der Raum wurde mittels platzender Ballons und rosa Rauschen angeregt. Für das Rauschen wurde ein eigens von der Firma Peutz Consult GmbH für diesen Zweck entwickelter Breitbandlautsprecher verwendet, der in diesem Fall eine Punktschallquelle darstellt.

Die Messungen bestätigten den ersten subjektiven Eindruck: auf Grund der vorherrschenden Materialien ist die Nachhallzeit zu lang. Auch der Sprachübertragungsindex, der Artikulationsverlust der Konsonanten, das Klarheits- und das Deutlichkeitsmaß weisen mit wachsendem Abstand zur Schallquelle unzureichende Werte auf. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Oktavbänder zeigt sich, dass vor allem im tieffrequenten Bereich die Nachhallzeit Werte von Kirchen erreicht.

Bei Verwendung der hauseigenen Beschallungsanlage sind die Ergebnisse ähnlich. Durch die verhältnismäßig breite Abstrahlcharakteristik der verwendeten Lautsprecher wird Schall auch in jene Bereiche des Raumes getragen, in denen sie nicht nur nicht von Nutzen sondern auch schädlich sind. Weiters kann es bei der Verwendung der Beschallungsanlage an einzelnen unerwarteten Positionen zu einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit kommen.

Grundsätzlich ist eine Optimierung der raumakustischen Parameter der Aula Lounge möglich. Auch dem Anspruch die Optimierungsmaßnahmen so optisch unauffällig wie möglich zu gestalten ist, kann entsprochen werden. Den größten Effekt würden allerdings eine Teilung des Raumes und die Beplankung der Trennwände mit Breitbandabsorbern erzielen. Wenn dann auch die verbleibenden Nischen mit schweren Akustikvorhängen ausgekleidet werden, wäre es möglich in dem verbleibenden Teil der Aula Lounge bei einer geübten Vortragenden oder einem geübten Vortragendem auf die elektroakustische Verstärkung der Stimme zu verzichten.

Auch ohne die Teilung des Raumes ist das Erreichen einer angenehmen Nachhallzeit möglich. In beiden Fällen ist es aber nötig durch Tiefenabsorber oder Bassfallen die Nachhallzeit in den unteren Frequenzbändern weiter zu verringern um einen lineareren Verlauf der Nachhallzeit zu erreichen.

## LEBENS LAUF

# Christoph Kiener BA

### Ausbildung

1994 – 2002	AHS GRG VIII Albertgasse, Wien 8
2002 – 2003	Zivildienst im Otto-Wagner-Spital in Wien
WS 2003/2004	Tontechnikstudium an der Universität für Musik und darstellende Kunst
2004 – 2006	Studium der Tontechnik am SAE Technology Institute in Wien
Juni 2006	Abschluss der SAE mit dem Audio Engeneer Diploma
Ab August 2006	Studium zum Bachelor of Arts auf dem SAE Technology Institute in Zusammenarbeit mit der Middlesex University
April 2007	Praktikum im Theater der Jugend
Juni 2007	Abschluss des Studiums zum Bachelor of Arts
2007 – 2013	Studium der Musikwissenschaft an der Universität Wien

### Sprachkenntnisse

Englisch, fließend; Französisch Grundlagen

### Ersatzdienst

Zivildienst geleistet vom 01.10.2002 bis 31.09.2003