

Planung der Raumakustik und der Beschallungsanlage eines Hörprobenraumes

Toningenieursprojekt

durchgeführt von

Markus Künstner



Institut für Breitbandkommunikation
Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. Franz Graf

in Zusammenarbeit mit

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH



Graz, im Juli 2010

Zusammenfassung

Diese Projektarbeit handelt von der Planung und dem Bau eines Hörprobenraumes im Gebäude der JOANNEUM RESEARCH in der Schießstattgasse 14/b in 8010 Graz. Im Zuge des „Advanced Audio Processing Project (AAP)“ sollte ein qualitativ hochwertiger Abhörraum zur Qualitätsbeurteilung von Audio Equipment, Sprachsignalen und weiteren akustischen Ereignissen entstehen. Die einzige Vorgabe zur Realisierung des Projektes war es, dass der Raum nach einem internationalen Standard, in diesem Fall der ITU-R BS 1116-1 [16] Standard, konzipiert werden sollte.

Am Beginn dieser Arbeit wurden die zum Verständnis wichtigen raumakustischen- sowie elektroakustischen Parameter zusammengefasst. Nach der Auflistung und Erklärung der zur Konstruktion eines Hörprobenraumes vorgeschlagenen Standards, führt ein Überblick über bereits bestehende Hörprobenräume hin zu den Ergebnissen der raumakustischen Simulation.

Durch akustische Messungen mittels der Software WinMLS konnte die Wirksamkeit einzelner Bauschritte dokumentiert und anschließend ein Vergleich zwischen Messung und Simulation durchgeführt werden.

Die Planung, Aufstellung und Verkabelung der gesamten Beschallungsanlage sowie das Einmessen des Mehrkanalsystems bilden den letzten Teil dieser Arbeit.

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Motivation	7
1.2	Aufgabenstellung	7
1.3	Überblick	7
2	Anforderungen an die Akustik eines Hörprobenraumes	9
2.1	Raumakustische Parameter	9
	<i>Nachhallzeit (TN)</i>	9
	<i>Anfangsnachhallzeit (EDT)</i>	9
	<i>Frühe Reflexionen</i>	10
	<i>Späte Energie</i>	10
	<i>Bassverhältnis (BR)</i>	10
	<i>Deutlichkeitsgrad nach THIELE (D50)</i>	11
	<i>Deutlichkeitsmaß (C50)</i>	11
	<i>Schwerpunktszeit (TS)</i>	12
	<i>Klarheitsmaß (C80)</i>	12
	<i>Seitenschallgrad, Seitenschallmaß (LF)</i>	12
	<i>Stärkemaß</i>	13
2.2	Elektroakustische Parameter	14
	<i>Frequenzgang von Lautsprechern</i>	14
	<i>Nichtlineare Verzerrungen</i>	14
	<i>Dynamikumfang</i>	14
	<i>Zeitverzögerung (in mehrkanaligen Systemen)</i>	15
	<i>Impulsgenauigkeit</i>	15
	<i>Bündelungsgrad bzw. Bündelungsmaß</i>	15
2.3	Standards zur Konstruktion eines Hörprobenraumes	16
	2.3.1 AES 20 16	
	2.3.2 EBU 3276	16
	2.3.3 IEC 60268-13	16
	2.3.4 N-12 A	17
	2.3.5 ITU-R BS 1116-1	17
2.4	Der Standard ITU-R BS 1116-1 im Detail	19
	2.4.1 Lautsprecher	19
	2.4.2 Abhörraum	21
	2.4.3 Schallfeldbedingungen	23
	2.4.4 Abhörlevel	25
	2.4.5 Platzierungen im Abhörraum	26
2.5	Bestehende Hörprobenräume und Stand der Technik	29
	2.5.1 Eine neue Art des Abhörraums und seine Charakteristika	29
	2.5.2 Finnish Broadcasting Company	31
	2.5.3 Minimale Anforderungen für Abhöräume	32

2.5.4	BBC Research & Development Department	32
2.5.5	Technische Universität in Helsinki	35
2.5.6	Ungarisches Radio Budapest	36
2.5.7	Universität von Surrey	38
2.6	Verweis auf die Basis dieser Arbeit	41
3	Ergebnisse der raumakustischen Simulation	42
3.1	Raumgeometrie und Simulationsmodell leerer Raum	42
3.2	Raumakustisch optimierter Raum	45
3.2.1	Absorbertypen	45
3.2.2	Absorberpositionen	47
3.3	Simulationsergebnisse	49
3.3.1	Leerer Raum	49
3.3.2	Optimierter Raum	52
4	Vermessung der raumakustischen Parameter während des Baus	55
4.1	Maximum Length Sequence (MLS)	55
4.2	Neuer Grundrissplan und neue Raumdimensionen	58
4.3	Messmikrofonanordnung und Quellenpositionen	61
4.4	Ablauf der Messung	64
4.5	Messung 1: Leerer Raum	66
4.6	Messung 2: Boden Grundaufbau	68
4.7	Messung 3: Akustikdecke und Boden fertig	71
4.8	Messung 4: Akustikvorhang und Türe	74
4.9	Messung 5: Linke Wand mit Absorber und Möbel	76
4.10	Messung 6: Rechte Wand mit Absorber und Möbel	79
4.11	Messung 7: Absorber hinten montiert	81
5	Vergleich von Messung und Simulation	85
5.1	Vergleich leerer Raum	85
5.2	Vergleich mit allen Absorbern bestückter Raum	88
5.3	Optimierung der raumakustischen Parameter	90
6	Planung der Beschallungsanlage	91
6.1	Anforderungen	91
6.2	Lautsprecher	91
6.3	Aufstellung	93
6.4	Stereophoner Kopfhörer und Verstärkereinheit	94

6.5 Kabel/Verlegung	95
7 Einmessen der Beschallungsanlage	97
7.1 Messaufbau	97
7.2 Kalibrierung	98
7.3 Grundgeräuschpegelmessung.....	98
7.4 Raumantwortkurve/Betriebsschallpegelkurve	99
7.5 Referenz - Abhörschallpegel.....	102
8 Zusammenfassung	107
9 Literaturverzeichnis	108

1 Einleitung

Durch die heutzutage schnelle Weiterentwicklung verschiedenster Technologien und Produktionsverfahren, werden auch an die daraus entstehenden Geräte immer höhere Qualitätsanforderungen gestellt. In der Audiotechnik ist eine Beurteilung solcher meistens an subjektive Bewertungen bzw. objektive Messungen gebunden. Um einen möglichst geringen Einfluss der Umgebung auf das Testobjekt zu erzielen, hat man 2 Möglichkeiten:

1. Man misst/evaluiert im freien Feld, oder
2. Man baut einen Raum, der Freifeldbedingungen aufweist.

Die Grundidee hinter der Konstruktion solcher Räume ist es, die Reflexionen des Schalls an den begrenzenden Flächen soweit zu absorbieren, dass nur der Direktschall des Testobjektes bewertet werden kann. Da, wie man sich sicherlich vorstellen kann, der Bau eines solchen reflexionsarmen Messraumes sehr teuer und für bestimmte Anwendungen auch nicht nötig ist, gibt es die Möglichkeit sich Hörproben- und Messräume mit dem zum Zwecke ausreichenden Absorptionseigenschaften zu entwerfen. Speziell für die subjektive Bewertung bzw. Qualitätsbeurteilung von Tonmaterial und Signalen entstehen weltweit immer mehr Hörprobenräume. Unterschiedlichste Organisationen und Arbeitsgemeinschaften von Audioexperten geben nach und nach Standards und Empfehlungen zur Konstruktion solcher Räume heraus. Immer öfters bilden diese Vorgaben die Basis für ein gelungenes Projekt.

Da es bei dieser Arbeit um die Planung und Bau eines Mehrkanal-Hörprobenraumes zur Qualitätsbeurteilung von Audiomaterial geht, wird dieser ebenfalls auf der Grundlage eines solchen Standards konzipiert. Nach einem gründlichen Vergleich der bis dato veröffentlichten Empfehlungen fällt die Wahl auf den ITU-R BS 1116-1 [16] Standard, da dieser als einer von wenigen genaue Angaben darüber macht, wie das Schallfeld im Raum auszusehen hat. Die dokumentarische Vermessung der Bauschritte und der Vergleich zwischen Messung und Simulation, sowie die komplette Planung und Installation der Beschallungsanlage verleihen dieser Arbeit einen sehr praxisbezogenen Charakter und man bekommt damit einen sehr guten Einblick in den Arbeitsbereich der Raumakustik.

1.1 Motivation

Als Auftraggeber für dieses Projekt zeichnet sich das „Advanced Audio Processing Project“ kurz „AAP“ verantwortlich, welches ein gemeinsames Projekt von JOANNEUM RESEARCH, dem Institut für Elektronische Musik und Akustik (KU Graz), dem Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation (TU Graz), Philips Austria GmbH, AKG Acoustics GmbH und ATRONIC Austria GmbH ist. Dieses Projekt wird im COMET-Programm der FFG gefördert. Den teilnehmenden Organisationen und Firmen war es ein Anliegen, einen eigenen Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz, zu bauen, welcher zur subjektiven Beurteilung der Qualität von Audioanwendungen herangezogen werden konnte. Zusammen mit dem vom AAP Projekt gestarteten „Expert listening panel for sound quality evaluation“, einem Pool von geschulten Probanden für Hörtests, hat man so eine ideale Arbeitsplattform in mitten von Graz geschaffen, von der aus man die Testergebnisse und weitere gewonnene Erkenntnisse in die Industrie und Forschung mit einfließen lassen kann.

1.2 Aufgabenstellung

Ein Hörprobenraum zur Qualitätsbeurteilung von Audiomaterial und Signalen wird gebaut und das Ziel dieser Arbeit soll die dokumentarische Vermessung der einzelnen Bauschritte, sowie der Vergleich zwischen Simulation und Messung, als auch die Planung, Installation, Verkabelung und Vermessung der Mehrkanal-Beschallungsanlage, sein. Die Basis dieses Bauprojektes bildet die von Andrea Sereinig, im Zuge ihres Toningenieursprojektes, durchgeführte Simulation des ausgewählten Raumes, welche sie in ihrer Arbeit: „Specification of a Standardized Listening Room for an Expert Listening Panel“ [23] beschrieben hat.

1.3 Überblick

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt 8 Kapitel. Am Anfang werden in Kapitel 2 die für das Verständnis wichtigen raumakustischen- sowie elektroakustischen Parameter aufgelistet. Ein Vergleich der bis jetzt existierenden Standards zur Konstruktion von Abhörräumen, der in dieser Arbeit verwendete ITU Standard im Detail und eine Übersicht über bereits bestehende Hörprobenräume schließen diesen ersten Teil ab.

Während in Kapitel 3 die Ergebnisse der raumakustischen Simulation wiedergegeben werden, beschäftigt sich Kapitel 4 mit der Vermessung der Parameter Nachhallzeit und Klarheitsmaß während des Baus.

Im fünften Teil dieser Arbeit steht ein Vergleich zwischen Messung und Simulation an. Dabei werden die Ergebnisse vom leeren- und von dem mit allen Absorbern bestückten Raum miteinander verglichen.

In Kapitel 6 wird die Mehrkanal-Beschallungsanlage zunächst geplant, richtig aufgestellt und verkabelt. Anschließend erfolgt unter Kapitel 7 das Einmessen des gesamten Systems.

Am Ende bildet die Zusammenfassung den Abschluss und somit Teil 8 dieser Arbeit.

2 Anforderungen an die Akustik eines Hörprobenraumes

2.1 Raumakustische Parameter

In diesem Unterkapitel werden die raumakustischen Parameter, die zum Verständnis des raumakustischen Planungsprozesses sowie zum Verständnis der darauffolgenden Standards wichtig sind, aufgelistet und kurz erklärt.

Nachhallzeit (RT)

Unter der Nachhallzeit versteht man das Zeitintervall T_{60} , innerhalb dessen der Schalldruck in einem Raum, bei plötzlichem Verstummen der Schallquelle, um 60 dB abfällt. [12]

Da die Messung eines Schalldruckabfalles von 60 dB in manchen Fällen nicht realisierbar ist, gibt es noch eine weitere Methode um die Nachhallzeit zu bestimmen. Dabei wird nicht der gesamte 60 dB Abfall gemessen, sondern nur zwischen -5 und -35 dB (T_{30}). Es können aber auch nur 20 oder 25 dB verwendet werden. Danach wird auf -60 dB extrapoliert und somit die Nachhallzeit bestimmt. [12]

Anfangsnachhallzeit (EDT)

Die EDT („Early Decay Time“) ist eine genauere Charakterisierung der Nachhallzeit. Da der Anfangsteil des Abklingvorganges im allgemeinen besser wahrgenommen wird, als der gesamte 60 dB Abfall der Nachhallzeit, dominiert er den subjektiv empfundenen Nachhall. Die Anfangsnachhallzeit wird nun bestimmt, indem man einen Abfall von 0 auf -10dB misst und diesen anschließend auf -60dB extrapoliert (unterschiedliche Raummoden, die die entsprechende Steigung des Abfalls bewirken, werden vernachlässigt). [1][7]

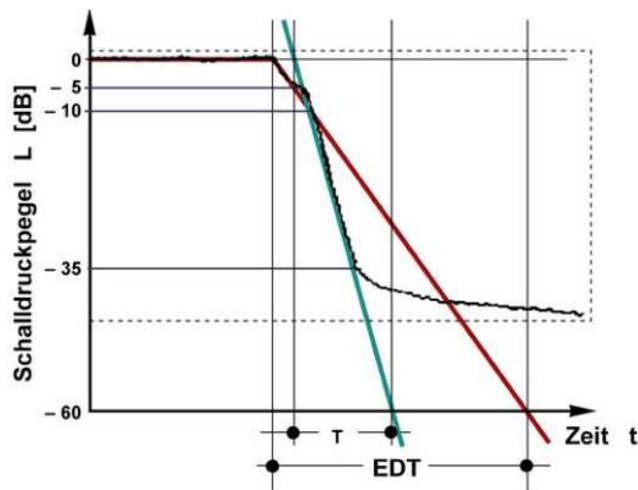


Abb. 2.1: Nachhallzeit T_N und Anfangsnachhallzeit EDT [4]

Frühe Reflexionen

Darunter versteht man in der Raumakustik den Anteil des reflektierten Schalls, der im unmittelbaren Anschluss an den Direktschall bei einem Hörer eintrifft. Für die raumakustische Bewertung eines Raumes haben die frühen Reflexionen entscheidenden Einfluss. Da das menschliche Gehör von frühen Reflexionen noch die Richtung bestimmen kann, tragen sie wesentlich zum Raumeindruck bei. Treffen sie im Zeitabstand unter ca. 60 ms nach der direkten Welle beim Zuhörer ein, so erhöhen sie den subjektiven Lautstärkeindruck und die in Alcons gemessene Sprachverständlichkeit. Später ordnen wir sie nicht mehr der direkten Welle zu und sie verwischen nur mehr den Klangeindruck. [16][1]

Späte Energie

Unter später Energie versteht man jenen Anteil der Schallenergie, der erst nach den frühen Reflexionen am Abhörplatz eintrifft. Je größer das Verhältnis von später zu früher Energie wird, desto mehr Probleme bekommt man mit Flatterechos und Kammfiltereffekten. [16]

Bassverhältnis (BR)

In Räumen für Musikdarbietungen ist ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen (unter 250 Hz) erwünscht. Dieser Anstieg gleicht die geringe Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen aus und gibt dem Klang „Wärme“. Hierfür wurde das Kriterium Bassverhältnis definiert:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} > 1$$

1,1 < BR > 1,3bei Konzertsälen

Es erfolgt hierbei eine Messung in Oktavbändern. Die Mittenfrequenz ist jeweils als Index angegeben. [12]

Deutlichkeitsgrad nach THIELE (D50)

Frühe Energie erhöht die Durchsichtigkeit und dadurch auch die Deutlichkeit. Bei Sprache liegt dieser Energieanteil etwa in einem Zeitbereich bis zu 50 ms nach dem Direktschall. Eine direkte messtechnische Beurteilung erfolgt durch die Definition des Deutlichkeitsgrades D₅₀. [12]

$$D_{50} = \frac{W_{0...50}}{W_{ges}} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\%]$$

W_{0...50}die in der Zeit von 0 bis 50 ms beim Hörer einfallende Energie

D₅₀ > 50%.....gute Verständlichkeit

Deutlichkeitsmaß (C50)

Aus der Definition der Deutlichkeit nach THIELE kann man das Deutlichkeitsmaß ableiten, das eine größere praktische Bedeutung hat, als der Deutlichkeitsgrad. Es gibt die Pegeldifferenz der vor bzw. nach 50 ms eintreffenden Schallenergie an. [12]

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...50}}{W_{50...∞}} = 10 \cdot \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \quad [dB]$$

C₅₀ > 2 dB sehr gute Verständlichkeit

2 dB > C₅₀ > -3 dB gute Verständlichkeit

-3 dB > C₅₀ > -8 dB noch ausreichende Verständlichkeit

Schwerpunktszeit (TS)

Das Quadrat des Schalldrucks wird über die Zeit integriert und liefert die Energie W_{ges} . Aus dem Flächenschwerpunktsatz ergibt sich die Schwerpunktszeit.

$$TS = \frac{1}{W_{ges}} \int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt \quad [s]$$

TS < 70 ms gute Sprachverständlichkeit

Die Schwerpunktszeit ist ein Maß für die zeitliche Lage hoher Leistungen. Eine kurze Schwerpunktszeit bedeutet einen steilen Abfall des Energieverlaufs. [12]

Klarheitsmaß (C80)

Das Klarheitsmaß für Musik entspricht dem Deutlichkeitsmaß für Sprache, wobei die Berechnung mit anderen Integrationsgrenzen erfolgt. Es beschreibt die Durchsichtigkeit, d.h. die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne (Zeitdurchsichtigkeit) und die Unterscheidbarkeit der verschiedenen Instrumente (Registerdurchsichtigkeit).

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}} \quad [dB]$$

0 dB < C ₈₀	hohe Durchsichtigkeit von Musik
-3 dB < C ₈₀ < 0 dB	Musik umhüllt Zuhörer

Es bewertet das Verhältnis zwischen der eintreffenden Energie bis 80 ms (fördert die Durchsichtigkeit) und der restlichen Energie. [12]

Seitenschallgrad, Seitenschallmaß (LF)

Der Seitenschallgrad (Lateral Fraction – LF) beschreibt die Stärke der seitlichen Reflexionen. Die seitlichen Reflexionen werden mit einem Mikrofon mit Achtercharakteristik gemessen und ins Verhältnis zum Ausgang eines Kugelmikrofons gesetzt. [1][7]

$$LF = \frac{(W_{5...80})_{seitl.}}{W_{0...80}} \quad [\%]$$

25% < LF < 40% wünschenswert für Konzertsäle

Bildet man vom Seitenschallgrad den Logarithmus zur Basis 10, so erhält man das Seitenschallmaß. Oft wird der Seitenschallgrad mit dem Empfinden „Räumlichkeit“ in Verbindung gebracht.

$$LF[\text{dB}] = 10 \cdot \log LF \quad [\text{dB}]$$

-6 dB < LF[dB] < -4 dB Optima

Stärkemaß

Dient zur Bewertung der Lautstärke und gibt die Energiedichte an, die bei einer gegebenen Sendeleistung einer Schallquelle vorhanden ist. Der Nenner bezeichnet die Bezugsschalleistung, die bei freier Schallausbreitung in 10 m Abstand von der Quelle ermittelt wird. G liegt idealerweise zwischen 0 und 10 dB. [1][12][7]

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^\infty p^2(x) dt}{\int_0^{\Delta t} p^2(r_s) dt \cdot 4\pi r_s^2 \cdot \left[\frac{1}{m^2}\right]} \quad [\text{dB}]$$

2.2 Elektroakustische Parameter

In diesem Unterkapitel werden einige elektroakustische Parameter aufgeführt, die für die Planung der Beschallungsanlage wichtig sind. Des Weiteren werden in den darauffolgenden Standards bestimmte Grenzen bzw. Vorgaben für diese Parameter getroffen.

Frequenzgang von Lautsprechern

Um das Übertragungsverhalten von Lautsprechern zu beschreiben, wird in der Akustik gerne der Begriff „Frequenzgang“ verwendet. Der Frequenzgang beschreibt ein lineares zeitinvariantes System, wie es sinusförmige Eingangssignale in Abhängigkeit von deren Frequenzen überträgt. Die Ausgangssignale haben wegen des linearen Verhaltens des Systems dieselbe Frequenz wie die Eingangssignale. Geändert sind ihre Amplituden und auch die Phasen sind verschoben. [30][15]

Nichtlineare Verzerrungen

Als solche bezeichnet man Verzerrungen, die in keinem linearen Zusammenhang zu den Eingangsgrößen stehen. In der Akustik kennt man vor allem harmonische nichtlineare Verzerrungen, die mit dem Begriff „Klirrfaktor“ bewertet werden. Für Klirr (THD = Total Harmonic Distortion) gibt es zahlreiche in der Psychoakustik gesicherte Wahrnehmungsschwellen, die von einem idealen Lautsprecher unter allen Hörbedingungen (Pegeln) zu unterschreiten sind.

Nichtlineare Verzerrungen entstehen beim Lautsprecher vor allem in der Membranaufhängung (nichtlineare Feder und Dämpfung) und beim Antrieb. [7]

Dynamikumfang

Dynamikumfang, Dynamikbereich oder einfach nur Dynamik bezeichnet im allgemeinen den Quotienten aus Maximum und Minimum einer physikalischen Größe oder Funktion. In der Tontechnik gibt der Dynamikumfang eines Audiosystems den Bereich an, indem sich der Pegel des Tonsignals nutzbringend bewegen kann, sei es für Aufzeichnung, Sendung oder Wiedergabe. Dieser Wert wird meistens in dB (Dezibel) angegeben. Nach unten wird der Dynamikbereich durch das Grundrauschen des Audiosystems begrenzt. Werden Signale unterhalb dieses Pegels ausgesteuert, würden sie vom Rauschen maskiert und dadurch unhörbar werden. Nach oben wird der Dynamikbereich durch Erreichen der maximalen Aussteuerung des Systems, ohne hörbares Übersteuern oder Verzerrungen, begrenzt. Der Dynamikumfang wird auch als „Signal-Rausch-Abstand“ oder English „Signal-to-Noise-Ratio (S/N-Ratio)“ bezeichnet. [14]

Zeitverzögerung (in mehrkanaligen Systemen)

Unter der Zeitverzögerung versteht man hier die zeitliche Differenz zwischen den verschiedenen Kanälen einer Mehrkanalanlage, die auf Grund von bauteiltechnischen Toleranzen entsteht. Für ein Stereo- bzw. Mehrkanalsysteme sollte die Zeitverzögerung zwischen den Kanälen unter 100 μ s liegen. [16]

Impulsgenauigkeit

Die Impulsgenauigkeit von elektroakustischen Systemen ist mitverantwortlich für das Empfinden von Klarheit und Präzision bei der Wiedergabe von musikalischem Material. Die exakte Reproduktion von Einschwing- und Ausschwingvorgängen von impulsartigen Sounds ist enorm wichtig, um z.B. akustische Instrumente originalgetreu abbilden zu können und um diese als „echt“ beurteilen zu können. [26]

Bündelungsgrad bzw. Bündelungsmaß

Der Bündelungsgrad γ gibt die Bündelungsfähigkeit des Schalls bei Lautsprechern, Mikrofonen und einzelnen Schallquellen im diffusen Schallfeld an. Er ist eine reine Verhältniszahl die angibt, um wie viel der Bündelungsgrad geringer ist, als der einer idealen Kugel. Je größer dieser Unterschied ausfällt, umso größer ist der Bündelungsgrad und damit die „Ausblendung des Raumes“ (Unterdrückung von diffusem Schall). Dieses Maß ist frequenzabhängig und steigt zu hohen Frequenzen hin üblicherweise an. [30]

Das Bündelungsmaß ist definiert als der Logarithmus des Bündelungsgrads und lässt sich wie folgt berechnen:

$$d(\omega) = 10 \lg \frac{S}{\oint \Gamma^2(\omega) dS} \text{ dB; wobei z.B. } S = 4\pi r^2 \text{ (Kugeloberfläche)}$$

Das Bündelungsmaß $d(\omega)$ entspricht der Differenz zwischen dem in Hauptabstrahlrichtung (0°) und im Abstand r gemessenen Schalldruckpegel $L_F(\omega)$ und dem am gleichen Messpunkt gemessenen Schalldruckpegel $L_K(\omega)$ eines gedachten Kugelstrahlers, der die gleiche Schallleistung $P(\omega)$ abstrahlt. [30]

2.3 Standards zur Konstruktion eines Hörprobenraumes

Da man für die spezielle Verwendung eines Abhörtraumes auch unterschiedliche Richtlinien oder Vorgaben zur Konstruktion eines solchen einhalten sollte, ist man bei einigen Organisationen bemüht, diese in sogenannten Standards oder Empfehlungen festzuhalten. Die derzeit am häufigsten verwendeten Standards werden im Folgendem kurz beschrieben, wobei sich zwei der fünf Empfehlungen durchgesetzt haben, nämlich der Standard ITU-R BS 1116-1 [16] und EBU 3276 [8,9]. Nur diese beiden Empfehlungen beinhalten auch genaue Anweisungen, wie der jeweilige Raum und das darin auftretende Schallfeld konzipiert sein müssen.

2.3.1 AES 20

Die Empfehlungen der AES 20, welche von der Audio Engineering Society (AES) 1996 niedergeschrieben wurden, haben sich auf internationalem Boden nicht durchgesetzt. Es konnte dazu auch keine Literatur gefunden werden, sodass dieser Standard hier nur kurze Erwähnung findet.

2.3.2 EBU 3276

Die European Broadcasting Union (EBU) hat zwei Arbeiten, in denen die Anforderungen für Abhörräume erläutert werden, erstellt. Das erste Dokument beschäftigt sich mit stereofonen Anforderungen [8] und das zweite mit mehrkanaligen Anforderungen [9]. Primäres Ziel ist das Erreichen eines gleichwertigen Klangerlebnisses für den Zuhörer wie zu Hause. Die EBU Empfehlungen basieren auf dem ITU-R BS 1116-1 [16] Standard. Die jeweiligen Abweichungen können in der Tabelle 2.2 nachgelesen werden.

2.3.3 IEC 60268-13

Einer der frühesten Standards für Abhörräume, das IEC 268-13 stammt aus dem Jahre 1985 und gilt als Vorgänger des IEC 60268-13 Standards, welcher 1998 veröffentlicht wurde. Das jetzige IEC 60268-13 hat das Ziel dem Hörer ein Gefühl eines häuslichen Höreindrucks zu vermitteln. Problem dabei ist jedoch, dass nirgendwo niedergeschrieben ist, für welche Region oder Umgebung die Spezifizierungen definiert sind. Das größte Defizit dieser Anordnung ist daher der regionale Unterschied zwischen den einzelnen Hörumgebungen, welche nicht näher definiert sind. Empfohlen wird ein möblierter Raum (Wohnzimmeratmosphäre) mit Teppichen, bequemen niedrigen Sitzmöglichkeiten und reflektierenden Deckenteilen. [5]

2.3.4 N-12 A

Die Norm wurde 1992 von der Nordic Broadcasting Company veröffentlicht und gilt nur für das Testen von Lautsprechersystemen. Da aber der in dieser Arbeit zu entwickelnde Abhörraum auch für Mikrofone und Sprache spezifiziert werden soll, ist eine weitere Ausführung dieses Standards nicht sinngemäß. [24]

2.3.5 ITU-R BS 1116-1

Wie das zuvor beschriebene IEC 60268-13 basiert auch das ITU-R BS 1116-1 [16] auf dem früh erschienenen IEC 268-13. Das ITU-R BS 1116-1 [16] ist ein Standard für die Bewertung von kleinen Beeinträchtigungen von Audiosystemen. Des Weiteren enthält dieser Standard Charakteristiken für die geometrischen sowie akustischen Bedingungen eines Abhörzimmers. Die wesentlichen Unterschiede zu IEC 268-13 sind folgende [5]:

- Kürzere Nachhallzeit
- Niedrigere Geräuschpegel
- Vorschriften für frühe Reflexionen
- Vorschriften für die auftretende Raumantwort
- Mangelndes Mobiliar

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über Abhörzimmer in Europa, deren Konstruktion auf dem ITU-R BS 1116-1 [16] Standard basiert.

Tab. 2.1: Vergleich der auf dem ITU-R BS 1116-1 Standard basierten Abhörzimmer in Europa [5]

	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Floor area (m ²)	Room volume (m ³)	Room orientation
BBC R&D [7]	6.76	4.94	2.70	33.40	90.20	wide
University of Surrey	7.35	5.70	2.50	41.90	104.70	long
Nokia Research Centre	5.83	5.31	2.70	31.00	83.60	long
Helsinki University of Technology [5]	6.35	5.60	2.70	35.60	96.00	long

In der Tabelle 2.2 werden die wichtigsten Parameter der einzelnen Standards miteinander verglichen und tabellarisch aufgeführt.

Tab. 2.2: Überblick der verschiedenen Standards[5]

	IEC 60268-13	ITU-R BS 1116-1 [1]	EBU 3276 [14,15]	AES 20	N-12 A
Application	Listening tests of loudspeakers in domestic environments	Subjective assessment of small impairments	Critical assessment and selection of programme material	Listening test of studio and high-quality loudspeakers	Reference listening room for listening tests
Basis	-	Expansion of IEC 60268-13	Similar to ITU-R BS 1116-1	-	-
Floor area (m ²)	1-2 channel: 25-40 Multichannel: 30-40	1-2 channel: 20-60 Multichannel: 30-70	>40	>20	60+/- 10
Room volume (m ³)	-	-	<300	50-120	-
Room shape	-	-	-	Rectangular advice	Rectangular or trapezoidal
Aspect ration	$(w/h) \leq (l/h) \leq (4.5(w/h - 4))$ $l/h \leq 3$ $w/h \leq 3$	$(w/h) \leq (l/h) \leq (4.5(w/h - 4))$ $l/h \leq 3$ $w/h \leq 3$	$(w/h) \leq (l/h) \leq (4.5(w/h - 4))$ $l/h \leq 3$ $w/h \leq 3$	$h > 2.1$ m	$l:w = 1.25 - 1.45$ $w:h = 1.1 - 1.9$ $l:h \leq 1.9$ or ≥ 2.1
Reverberation time (s)	$T_m = 0.3 - 0.6$ (1/3 Octave, 200-4000 Hz)	$T_m = 0.25(V/V_0)^{1/3}$ (200-4000 Hz) $V_0 = 100$ m ³	$T_m = 0.25(V/V_0)^{1/3}$ (200-4000 Hz) $V_0 = 100$ m ³	0.45 s (mid-range)	$T_m = T_0(S/S_0)^{1/2}$ (200-2500 Hz) $S_0 = 60$ m ² and $T_0 = 0.35$ s
Early energy	-	10 dB attenuation of early reflections (15 ms, 1-8 kHz)	10 dB attenuation of early reflections (15 ms, 1-8 kHz)	-	Sufficient diffusion over listening area to avoid flutter echoes
Late energy	-	-	-	Suppress flutter echoes	10 dB attenuation of early reflections (10 ms, >400 Hz)
Background noise level	NR 15	NR 10, NR 15 max.	NR 10, NR 15 max.	35 dBA and 50 dBC	NR 10 or 15 dBA
Loudspeaker issues	1-2 channel and multichannel	1-2 channel and multichannel	1-2 channel and multichannel	-	Refer to Recommendation N 12-B for loudspeaker requirements (1 - 2 channel only)
Listener issues	-	-	-	-	Capacity: 6 - 10 listeners

2.4 Der Standard ITU-R BS 1116-1 im Detail

Für den in dieser Arbeit zu spezifizierenden Abhörraum wurde der in Kapitel 2.2.1 kurz beschriebene ITU-R BS 1116-1 [16] Standard gewählt. Abgesehen davon, dass die Raumgröße dem Standard entspricht, weist diese Empfehlung auch genaue Anweisungen für dessen Schallfeldparameter auf. In den nun folgenden Kapiteln werden die Anforderungen für die Referenzlautsprecher, den Abhörraum, die Schallfeldbedingungen und die Abhörbedingungen beschrieben und zwar so, wie sie im Standard ITU-R BS 1116-1 [16] verlangt werden.

2.4.1 Lautsprecher

Die nachfolgenden elektroakustischen Anforderungen wurden unter Freifeldbedingungen gemessen.

2.4.1.1 Elektroakustische Anforderungen

Amplitude vs. Frequenzgang

Der Frequenzgang der verwendeten Lautsprecher, welcher in Terzbändern mit rosa Rauschen als Anregungssignal gemessen wird, muss in einem Frequenzbereich von 40 Hz – 16 kHz in einem 4 dB-Toleranzband liegen. Gemessen wird in der x-Hauptachse (Winkel 0°). Frequenzantworten, die in einem Winkel von $\pm 10^\circ$ von der Hauptachse gemessen wurden, dürfen nicht mehr als 3 dB Unterschied im Vergleich zur 0°-Messung aufweisen.

Bei einem Abweichungswinkel von $\pm 30^\circ$ darf der Unterschied zur 0°-Messung nicht mehr als 4 dB ausmachen.

Die Frequenzgänge von verschiedenen Lautsprechern sollten miteinander verglichen werden. Die Unterschiede sollten den Wert von 1 dB im Frequenzbereich von 250 Hz – 2 kHz nicht überschreiten.

Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß C , welches mit Terzbandrauschen gemessen wird, sollte im Frequenzbereich von 500 Hz – 10 kHz in den Grenzen von

$$6 \text{ dB} \leq C \leq 12 \text{ dB sein.}$$

Das Bündelungsmaß sollte mit zunehmender Frequenz leicht ansteigen.

Nichtlineare Verzerrung

Der Lautsprecher wird mittels spannungskonstantem Input mit einem Schalldruckpegel von 90 dB betrieben. Entsprechend dem Schalldruckpegel darf die Verzerrung der einzelnen harmonischen Komponenten im Frequenzbereich von 40 Hz – 16 kHz folgende Werte nicht überschreiten:

$$-30 \text{ dB (3\%)} \text{ für } f < 250 \text{ Hz}$$

$$-40 \text{ dB (1\%)} \text{ für } f \geq 250 \text{ Hz}$$

Einschwingverhalten

Die Abklingzeit, welche mittels eines Oszilloskops auf einem veränderten Level (ca. 0,37 des Originalpegels) in der Hauptachse gemessen wurde, sollte folgendermaßen aussehen:

$$t_s < 5/f$$

Das bedeutet, dass die Abklingzeit eines sinusförmigen Impulses nicht länger als die 5-fache Periodendauer der entsprechenden Sinuswelle ist.

Laufzeitdifferenz

Die Laufzeitdifferenz zwischen den Kanälen für Stereophonie oder Mehrkanaltechnik darf nicht mehr als 100 ms betragen.

Dynamikbereich

Der größtmögliche Schallpegel, der vom Lautsprecher über 10 min abgegeben werden kann, ohne dass dabei thermische oder mechanische Beschädigungen am Lautsprecher sowie eine Überbelastung der Schaltkreise auftritt, sollte bei

$$L_{\text{eff max}} > 108 \text{ dB}$$

liegen (von einem Schallpegelmeter gemessen).

Der entsprechende Störgeräuschpegel, der von einem Referenzlautsprecher mit dazugehörigem Verstärker erzeugt wird, sollte gemessen in 1 m Abstand vom akustischen Zentrum folgenden Wert aufweisen:

$$L_{\text{noise}} < 10 \text{ dBA}$$

2.4.2 Abhörraum

Im Folgenden Abschnitt werden nun die Minimalanforderungen an einen Abhörraum beschrieben.

2.4.2.1 Geometrische Eigenschaften

Raumgröße (Grundfläche)

- Für monophone oder stereophone Wiedergabe: 20-60 m²
- Für mehrkanalige Wiedergabe: 30-70 m²

Raumform

Der Raum sollte symmetrisch sein und der Boden die Form eines Rechteckes oder eines Trapezes aufweisen.

Raummaße

Die folgenden Relationen sollten eingehalten werden, damit im tieffrequenten Bereich die Eigenmoden gut verteilt werden:

$$1.1 \quad w/h \leq l/h \leq 4.5 \quad w/h - 4$$

dabei entspricht: $l \rightarrow$ Länge; $w \rightarrow$ Breite; $h \rightarrow$ Höhe.

Des Weiteren sollte noch folgendes gelten: $l/h < 3$ und $w/h < 3$

2.4.2.2 Raumakustische Eigenschaften

Nachhallzeit

Der Durchschnittswert der Nachhallzeit, der in einem Frequenzbereich von 200 Hz – 4 kHz gemessen wird, sollte folgenden Wert annehmen:

$$T_m = 0,25 (V / V_0)^{1/3} \text{ s}$$

dabei entspricht: $V \rightarrow$ Raumvolumen; $V_0 \rightarrow$ Referenzvolumen von 100 m³.

Abbildung 2.2 zeigt das Toleranzschema der Nachhallzeit bezüglich des Durchschnittswertes T_m im Bereich von 63 Hz – 8 kHz.

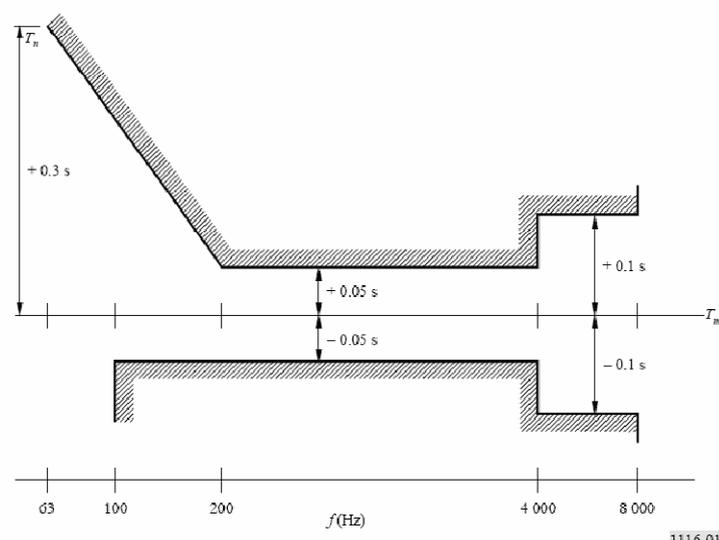


Abb. 2.2: Toleranzgrenzen der Nachhallzeit bezüglich des Durchschnittswertes T_m [16]

2.4.3 Schallfeldbedingungen

Die Charakteristiken eines Schallfelds sind von größter Bedeutung für die subjektive Wahrnehmung von auditiven Ereignissen. Im Folgenden werden nun einige dieser Charakteristika beschrieben.

2.4.3.1 Direktschall

Frequenzgang des Lautsprechers

Der Frequenzgang des Lautsprechers, welcher unter Freifeldbedingungen gemessen wurde, sollte die in Kapitel 2.4.1.1 beschriebenen Voraussetzungen erfüllen.

2.4.3.2 Reflektierter Schall

Frühe Reflektionen

Frühe Reflektionen entstehen durch das Zurückwerfen des Schalls an umgebenden Oberflächen. Sie liegen in einem Zeitfenster von 15 ms nach Eintreffen des Direktschalls und sollten im Frequenzbereich von 1 – 8 kHz um 10 dB geringer sein, als der Direktschallpegel.

Späte Energie

Zusätzlich zu den Anforderungen für frühe Reflexionen und der Nachhallzeit, müssen auch andere Anomalien wie zum Beispiel Flatterechos oder Klangverfärbungen vermieden werden. Bei der Analyse des Reflektogrammes können diese Probleme sehr gut erkannt werden.

2.4.3.3 Stationäres Schallfeld

Raumantwortkurve

Die Kurven der Raumantwort sind definiert als die Terzband Frequenzantwort des Schalldruckpegels, welcher durch die einzelnen Lautsprecher produziert wird. Als Anregungssignal dient rosa Rauschen in einem Frequenzbereich von 50 Hz – 16 kHz. Die gemessenen Kurven sollten in das Toleranzschema, welches in Abbildung 2.3 gezeigt wird, hineinfallen.

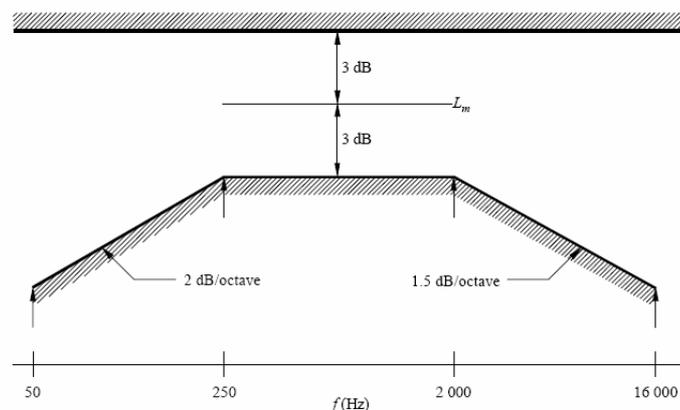


Abb. 2.3: Toleranzschema für die Raumantwortkurve [1]

Des Weiteren dürfen die Raumantwortkurven, welche von den beiden Frontlautsprechern erzeugt und am Abhörpunkt gemessen werden, nicht mehr als um 2 dB im gesamten Frequenzbereich variieren.

Störgeräusch

Der gleich bleibende Störgeräuschpegel entsteht z.B. durch das Laufen einer Klimaanlage oder anderer Gerätschaften. Der in einer Höhe von 1,2 m über dem Boden gemessene Störgeräuschpegel sollte die in Abbildung 2.4 gezeigten Kurven nicht übersteigen.

NR 10 (Noise Rating) sollte vorzugsweise nicht überschritten werden. Auf gar keinen Fall darf aber die NR 15 überschritten werden.

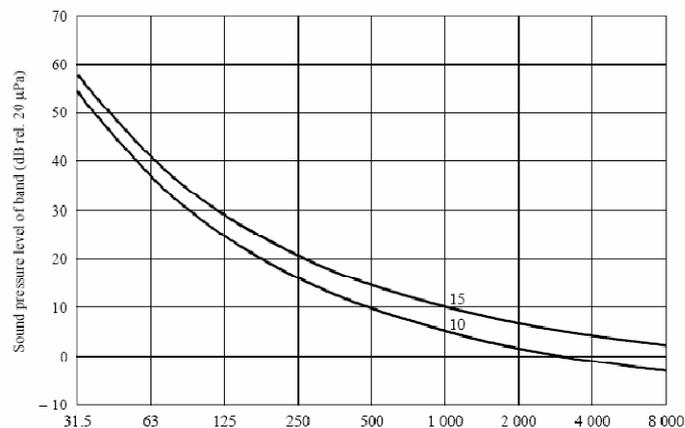


Abb. 2.4: gemessene Störgeräuschkurven, die laut ISO Recommendation R1996 nicht überschritten werden sollte [16]

2.4.4 Abhörlevel

2.4.4.1 Referenz – Abhörschallpegel (reference listening level)

Der Referenzabhörpegel ist definiert als der bevorzugte Abhörpegel, welcher durch ein gegebenes Messsignal am Abhörpunkt gegeben ist. Er charakterisiert die akustische Verstärkung des reproduzierten Kanals um sicherzustellen, dass der Schalldruckpegel in verschiedenen Abhörräumen identisch ist.

Für den Pegelabgleich zwischen den einzelnen Lautsprechern muss rosa Rauschen verwendet werden. Wird ein Messsignal mit einer Effektivspannung, die dem "alignment signal level" (0 dB μ 0s entsprechend der Norm ITU-R BS.645; – 18 dB unter dem Clipping-Level eines digitalen Aufnahmerekorders entsprechend der Norm [EBU, 1992]) entspricht, abwechselnd auf die einzelnen Reproduktionskanäle geschaltet, so soll der Verstärker um den Referenzschalldruckpegel wiederzugeben auf folgenden Wert gestellt sein:

$$L_{ref} = 85 - 10 \log n \pm 0.25 \text{ dBA}$$

n ist dabei die Anzahl der Reproduktionskanäle des kompletten Setups.

2.4.5 Platzierungen im Abhörraum

Das folgende Kapitel beschreibt die Positionierung der Lautsprecher und die Position des Abhörplatzes im Raum.

Höhe und Ausrichtung der Lautsprecher

Die Montagehöhe der Lautsprecher, bezüglich des akustischen Zentrums des Lautsprechers sollte 1,20 m über dem Boden sein. Das entspricht der Ohrenhöhe einer sitzenden Person. Die Lautsprecher sollten so ausgerichtet sein, dass ihre Referenzachsen die Abhörposition in einer Höhe von 1,20 m schneiden.

Entfernung zur Wand

Für frei stehende Lautsprecher sollte die Entfernung des akustischen Zentrums zu umgebenden reflektierenden Oberflächen mindestens 1 m betragen.

Monophone Reproduktion

Für die Reproduktion von Monosignalen muss ein einzelner Lautsprecher verwendet werden. Der minimale Hörabstand sollte 2 m betragen und alle Abhörpositionen sollten innerhalb eines $\pm 30^\circ$ Winkels bezüglich der Lautsprecherachsen sein.

Abbildung 2.5 zeigt die Entfernung zum Lautsprecher sowie den dazugehörigen Abhörbereich für monophone Reproduktion.

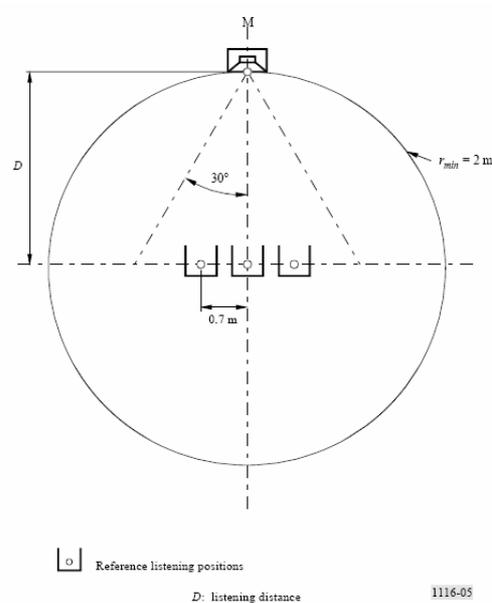


Abb. 2.5: Aufstellung des Lautsprechers M und der zulässige Abhörbereich für monophone Reproduktion [16]

Zweikanalige stereophone Reproduktion

- **Basisweite B:** Bevorzugte Werte für B sind 2-3 m. Werte für B bis zu 4 m sind für entsprechend ausgestattete Räume akzeptabel.
- **Hörabstand D zw. Zuhörer und Lautsprecher:** Der Hörabstand D muss innerhalb folgender Grenzen liegen: $D = 2$ bis $1,7 B$ [m]
- **Abhörposition:** Der Referenzabhörpunkt ist definiert für einen Abhörwinkel von 60° . Der empfohlene Abhörbereich sollte nicht über einen Radius von 0,7 m über den Abhörpunkt hinausgehen.

Abbildung 2.7 zeigt das Aufstellungssetup für mehrkanalige stereophone Reproduktion. Auch hier sind ungeeignete Abhörplätze eingezeichnet.

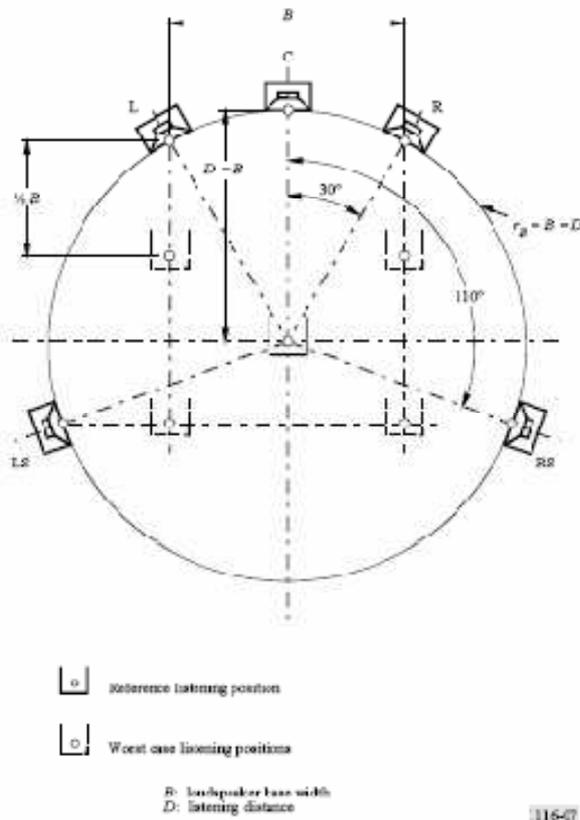


Abb. 2.7: Aufstellungssetup der Lautsprecher L/C/R und RS/LS sowie der passende Abhörplatz für mehrkanalige Reproduktion [16]

2.5 Bestehende Hörprobenräume und Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden bereits existierende Abhörräume mit unterschiedlichen Standardisierungen vorgestellt. Es wird auf die spezifischen Merkmale der jeweiligen Räume eingegangen. Die Aufzählung erfolgt chronologisch.

2.5.1 Eine neue Art des Abhörraums und seine Charakteristika

Das früheste Dokument, welches sich mit diesem Thema beschäftigt, stammt von den beiden japanischen Wissenschaftlern Ishii und Mizutani. Es wurde 1982 bei der 72. AES-Convention in Anaheim, Kalifornien präsentiert. [17]

Es wird versucht die bereits bekannten Probleme von herkömmlichen Abhörräumen in den Griff zu bekommen. Diese Probleme wären[17]:

- Die Frequenzantwort der reflektierten Welle ist nicht eben.
- Die Frequenzantwort der reflektierten Welle hängt von der Einfallsrichtung ab.
- Tiefe Frequenzen klingen „boomy“ durch das Vibrieren der Holzvertäfelung.
- Der Frequenzbereich ist begrenzt und daher ungeeignet für hohe Klangwiedergabetreue.
- Das Design ist kompliziert und zeitaufwendig.

Die neue Art des Abhörraums wird unter der Benutzung von nur zwei Materialien konstruiert. Es werden nur reflektierende und absorbierende Materialien verwendet. Abbildung 2.8 zeigt den Grundriss des geplanten Raumes.

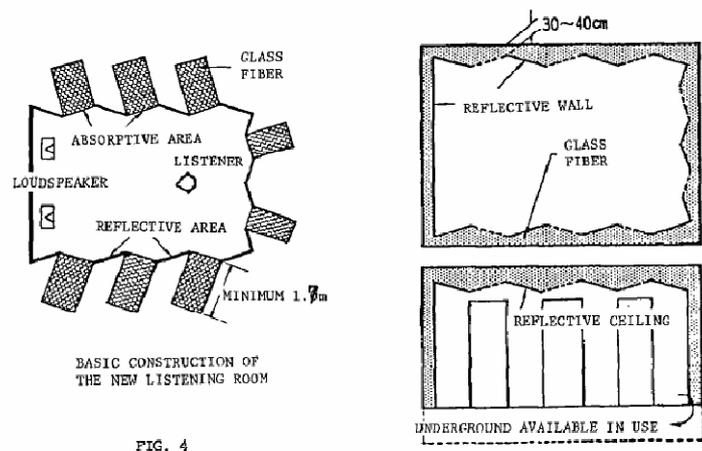


Abb. 2.8: Grundriss des Abhörraums (links) und die raumsparende Alternative (rechts) [17]

Der oben gezeigte Raum hat bessere Eigenschaften um die vorhin erwähnten Probleme zu vermeiden. Diese wären:

- Der reflektierte Schall ist frequenzunabhängig.
- Auch kurze Impulse bewahren ihre Wellenform.
- Die unelastische Wand fängt nicht zu vibrieren an.

- Der Raum ist leicht zu designen.
- Die Nachhallzeit des Raumes lässt sich frequenzunabhängig nur durch Verwendung eines "sliding reflector" verändern. Die Nachhallzeit ist dann nur noch von der Position des Reflektors abhängig.

2.5.2 Finnish Broadcasting Company

1985 präsentierten Korhonen und Borenus bei der 77. AES- Convention ihren Entwurf eines Abhörzimmers. Der Raum wurde 1984 in der Finnish Broadcasting Company fertig gestellt und dient dort der speziell dafür gegründeten „Hörergruppe“ zur Entwicklung und Bewertung von Aufnahmen und technischem Equipment. Entwickelt wurde der Raum von der internationalen Radio und Television Organisation OIRT. Die Anforderungen, welche an den Raum gestellt wurden, können unter ihrem veröffentlichten Artikel nachgelesen werden. [6]

Das auffälligste Merkmal des Raumes ist der achteckige Grundriss. Die Wände der Ecken bestehen aus soliden Holzspanplatten. Lautsprecher können angebracht werden, ohne dass sie Vibrationen verursachen. Abbildung 2.9 zeigt den Grundriss des Abhörzimmers sowie die Möglichkeit einen Lautsprecher in der Wand versenken zu können. Die Grundfläche des Raumes beträgt 58 m², das Volumen beträgt 189 m³. [6]

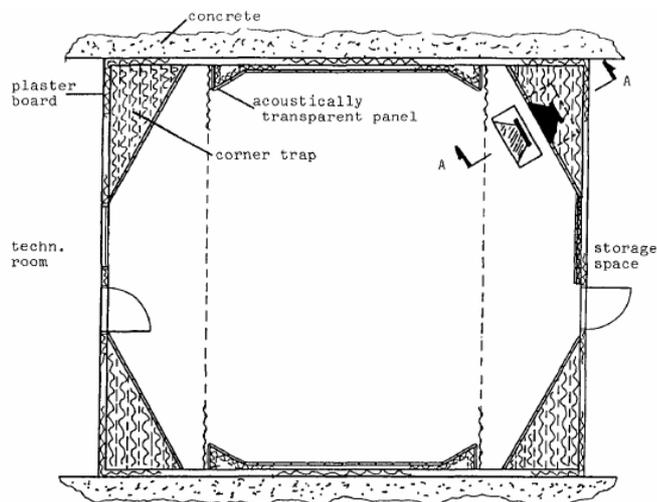


Abb. 2.9: Grundriss des Abhörzimmers in der Finnish Broadcasting Company [6]

2.5.3 Minimale Anforderungen für Abhörräume

1988 stellte Gerhard Steinke seine Empfehlungen für einen Abhörraum auf der 88. AES-Convention in Paris vor. Obwohl es bereits akzeptable Veröffentlichungen über Abhörräume gab, wollte er seine eigenen Empfehlungen niederschreiben, da er der Meinung war, dass die bereits bestehenden Dokumente zu sehr variieren. Basierend auf einer Vielzahl von Vorschlägen der CCIR, der UER, der OIRT und der Nordic Broadcasting Company, konstruierte Steinke eine detaillierte Anweisung zur Ausstattung eines Abhörraums. [25]

2.5.4 BBC Research & Development Department

Das BBC Research & Development Department in Tadworth England ist eine der weltweit führenden Institutionen die sich mit der Entwicklung und dem Design von Abhörräumen beschäftigt. In den beiden folgenden Unterkapiteln werden nun zwei Methoden des Wissenschaftlers Robert Walker vorgestellt. Walker beschäftigte sich mit der Problembehandlung der frühen Reflexionen. Seine Arbeit *“A new approach to the design of control room acoustics for Stereophony“* [27] wurde im März 1993 bei der 94. AES-Convention in Berlin präsentiert. Fünf Jahre später präsentierte er in Amsterdam *“A controlled-reflection listening room for multichannel sound“* [29]. Ausgehend von seinen beiden Arbeiten wird nun versucht das Design für den jeweiligen Raum zu erklären.

2.5.4.1 Raumakustik für Stereophonie

Mit dem Auftreten der Stereophonie, wurde auch die Problematik mit frühen Reflexionen bis 20 ms nach dem Eintreffen des Direktschalls und die daraus resultierenden Verfälschungen in der Wahrnehmung offenkundig. Als Folge wurden nun „akustisch tote“ Räume mit Nachhallzeiten bis 0,15 Sekunden gebaut. Diese waren nicht nur teuer, sondern auch sehr beklemmend. [27, 28]

1993 entwickelte Robert Walker im BBC Research & Development Department einen Abhörraum. Anforderungen waren ein stereofones Klangbild, welches nicht mehr so sehr raumabhängig ist und gleichzeitig eine Nachhallzeit von 0,35 Sekunden aufweist. [27]

Das Hauptaugenmerk dieses Konzeptes lag darin, die frühen Reflexionen vom Abhörplatz abzulenken und in eine Art imaginären Kreis (*“circle of exclusion“*) um den Zuhörer zu bringen. Auf der einen Seite wird dadurch das Stereobild schärfer und auf der anderen Seite erhält der Zuhörer ein angenehmes Umfeld. Unter Verwendung von winkelförmigen, reflektierenden Oberflächen vor dem Zuhörer und hinter den Lautsprechern wurde das gewünschte Klangbild erreicht. Das Praktische an dieser Herangehensweise ist die Tatsache, dass auf einmal störende reflektierende Oberflächen, wie Spiegeln oder Fensterscheiben, eine nutzbringende Funktion im Gesamtkonzept übernehmen [27].

Abbildung 2.10 zeigt den Grundriss sowie den imaginären Klangkreis des 33,8 m² großen Raums.

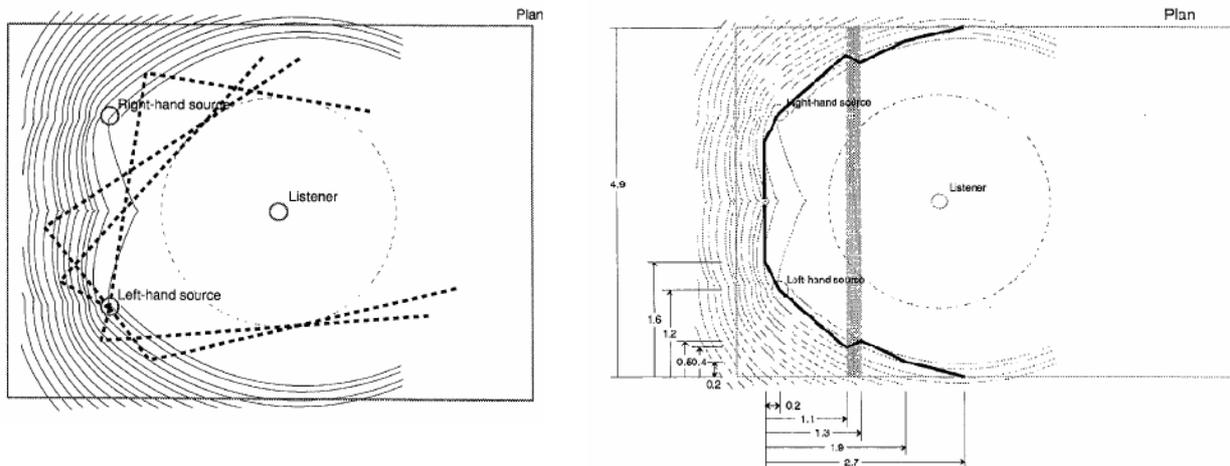


Abb. 2.10: Zustandekommen des imaginären Klangkreises(links); Raumplan des erwähnten Testraums(rechts) [27]

2.5.4.2 Raumakustik für Mehrkanaltechnik

Die Herangehensweise für diesen Raum ist jener aus 2.5.4.1 sehr ähnlich. Im August 1997 wurde der Raum unter Berücksichtigung des Standards ITU [16] und EBU [8, 9] fertig gestellt.

Für einen angenommenen Raum mit fünf Lautsprechern und sechs Hauptreflektoren würde es 30 Reflexionen 1. Ordnung und 150 Reflexionen 2. Ordnung geben. Die Reflexionen 2. Ordnung können aufgrund der natürlichen Dämpfung ignoriert werden. Reflexionen deren Weg länger als 6,43m ist, werden um 10 dB gedämpft. Die restlichen Reflexionen 1. Ordnung werden danach mittels winkelförmigen Absorbern und Reflektoren an der Wand wieder so umgeleitet, dass der "circle of exclusion" wieder entstehen kann. Abbildung 2.11 zeigt den Grundriss des Raums mit Absorbern und Reflektoren und den "circle of exclusion". Die Grundfläche des Raums beträgt 33,4 m², das Volumen ergibt 107 m³. [29]

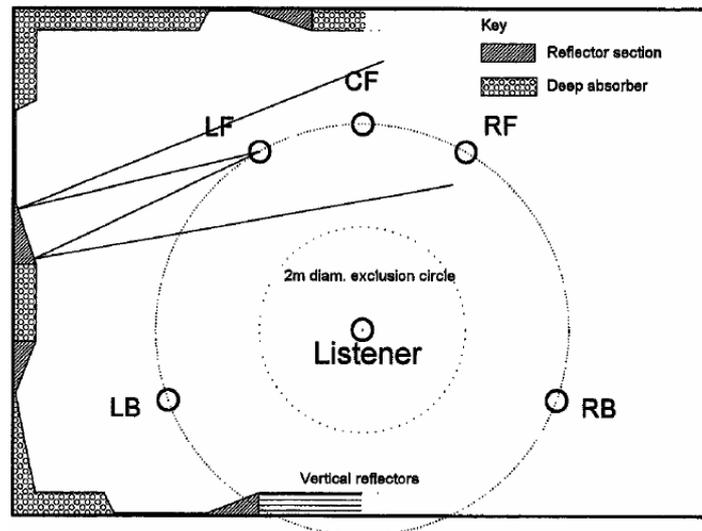


Abb. 2.11: Grundriss des Raums mit Reflektoren und Absorbern (Halbraum) und imaginären "circle of excursion" [29]

Für die Absorption des tiefen Frequenzbereiches wurde von der BBC ein eigener Tiefenabsorber gebaut [3], der z.B. in großen Fernsehstudios Verwendung findet. Er besteht aus 180 mm dicken Metallstollen, die gänzlich mit mittelfester Glaswolle gefüllt sind. Die vordere Seite wurde aus Sicherheitsgründen mit kleinen Metallschleifen und zur besseren Absorption der tiefen Frequenzen mit einem 1 mm dicken Metallblatt bedeckt. Um die Empfindlichkeit im 400 Hz- Bereich zu erhöhen, wird die Oberfläche mittels 3 mm dicken Löchern perforiert und mit Glaswolle gefüllt [29]. Abbildung 2.12 zeigt die Nachhallzeit sowie den Toleranzbereich an.

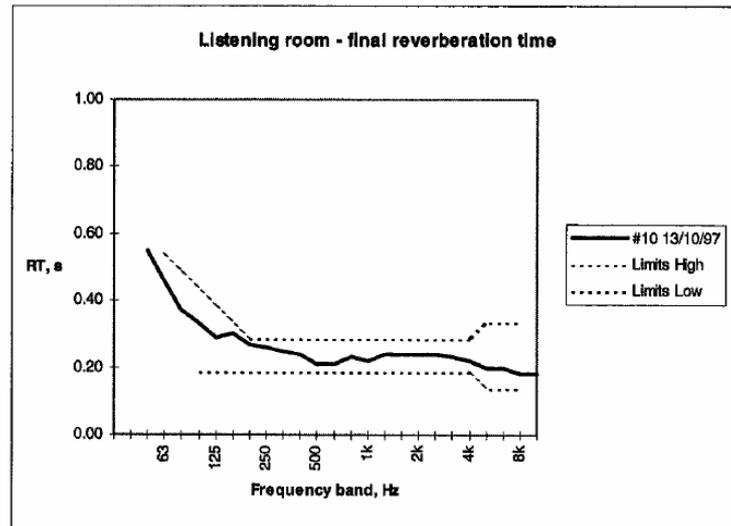


Abb. 2.12: Durchschnittliche Nachhallzeit des Abhörtraums mit den Toleranzgrenzen [29]

2.5.5 Technische Universität in Helsinki

Im September 1997 präsentierte der finnische Wissenschaftler Attni Järvinen mit anderen wissenschaftlichen Kollegen bei der 103. AES-Convention in New York seine Arbeit mit dem Titel *“Design of a Reference Listening Room - A Case Study”*. Darin beschreibt und vergleicht er verschiedene Normen und Standards über Raumgeometrie, Nachhallzeiten und Störgeräuschpegel. Zusätzlich werden verschiedene Modellierungsmöglichkeiten und Möglichkeiten der Nachhallzeitmessung miteinander verglichen. [18]

Der 1997 fertig gestellte Abhörtraum der technischen Universität in Helsinki entspricht dem Standard ITU-R BS 1116-1 [16]. Die Gründe für den Bau des Raums waren die vermehrten Anfragen für Entwicklungsprojekte im Bereich der subjektiven Beurteilung von Signalen am Institut für Akustik und Audio- Signalverarbeitung. Die Autoren geben einen Überblick über die Entwicklungsstufen des Designs, der verwendeten Absorber, der Heizung und der Belüftung. Abbildung 2.13 zeigt den Grundriss des Abhörtraums (Grundfläche 35,6 m², Volumen 96 m³) in der technischen Universität in Helsinki, in dem statt eines bisher gebräuchlichen Diffusors (Streukörper) ein modifizierter Schroeder Diffusor verwendet wurde. [18]

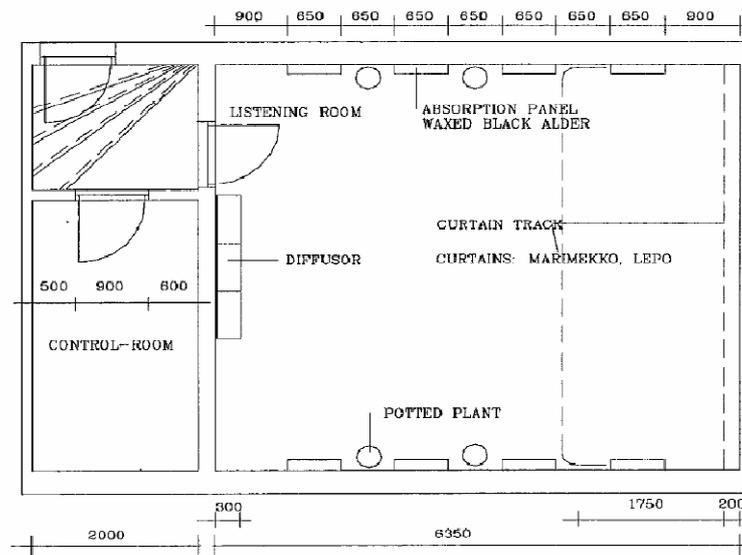


Abb. 2.13: Grundriss des Abhörtraumes an der technischen Universität in Helsinki [18]

2.5.6 Ungarisches Radio Budapest

Auf der 104. AES- Convention in Amsterdam im Mai 1998 präsentierte Eva Arato-Borsi vom Ungarischen Radio Budapest mit einigen Kollegen ihre Arbeit *“New Reference Listening Room for Two-Channel and Multichannel Stereophonic”*. Ziel der Arbeit war es einen Abhörtraum zu designen, der die Standards für stereofone Raumakustik und später für mehrkanalige Raumakustik erfüllt. Abhängig von der Raumgröße (Grundfläche 55 m², Volumen 267 m³) wurde als Standard das EBU 3276 [8,9] gewählt. [2]

Als Modellierungsverfahren diente die Finite Element Methode. Abbildung 2.14 zeigt den Grundriss sowie eine 3-D Ansicht des entworfenen Raums.

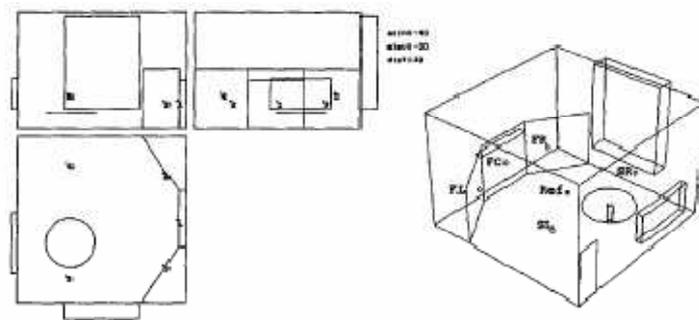


Abb. 2.14: Grundriss des Abhörtraums des Ungarischen Radio Budapest (links), 3-D Ansicht mit fünf Schallquellen und Abhörposition (rechts) [2]

Untenstehende Abbildungen 2.15 und 2.16 zeigen die Platzierungen von Absorbern und Diffusoren sowie die Visualisierung der Wellenausbreitung.

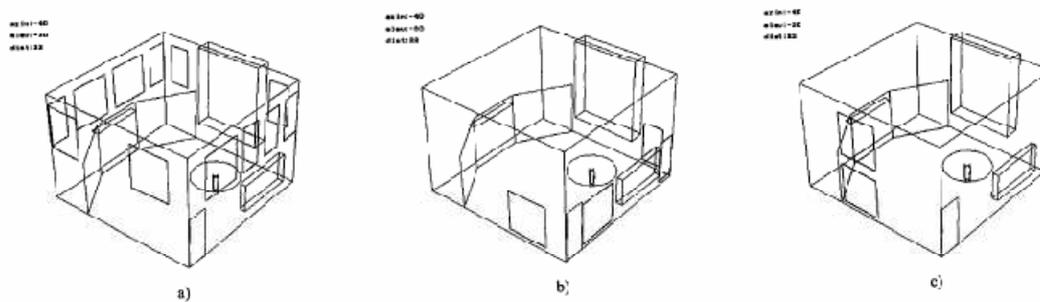


Abb. 2.15: Anordnung der verschiedenen akustischen Elemente [2]

a) Tiefenabsorber; b) Diffusoren; c) Breitbandabsorber

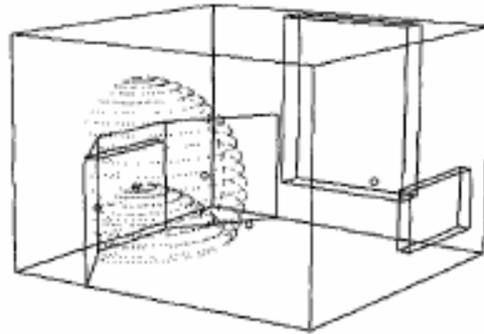


Abb. 2.16: Visualisierung der Wellenausbreitung [2]

2.5.7 Universität von Surrey

Bei der 110. und 112. AES- Convention in den Jahren 2001 und 2002 präsentierten Amber Naqvi und Francis Rumsey ihre Arbeit mit dem Titel *“The active listening room simulator“*. Eines der Ziele dieses Projekts war es, einen Abhörraum zu konstruieren, in dem die akustischen Parameter variiert werden konnten, um so geringfügig veränderte Hörbedingungen zu schaffen. Möglich gemacht wurde dies aufgrund kleiner Abweichungen in den jeweiligen Standards wie ITU-R 1116 [16] oder IEC 286-13 [5]. Der Versuch wurde an der Universität in Surrey in einem dem ITU-R 1116-1 [16] Standard entsprechenden Raum (Grundfläche 39,17m², Volumen 97,94 m³) durchgeführt. [20, 21, 22]

2.5.7.1 Active Listening Room Simulator-Teil 1

Im ersten Teil der Arbeit wurde nur ein Lautsprecher verwendet. Dieser wurde in einer Raumecke aufgebaut. Die Reflektoren um den Lautsprecher werden so angeordnet, dass sie die reflektierten Wellen nicht zur Abhörposition zurücklenken. Die Aufstellung basiert auf einem Computermodell, welches mittels der handelsüblichen Software CATT Acoustics® erstellt wurde. [20]

Abbildung 2.17 zeigt die durch die Software erstellte dreidimensionale Ansicht des Raums mit Lautsprecher und Reflektoren.

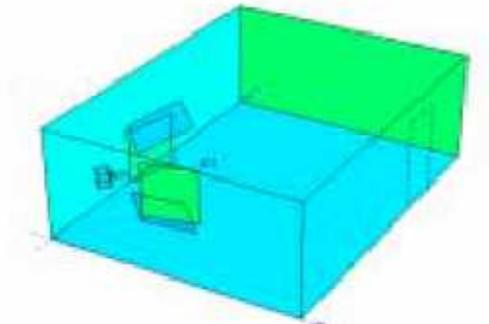


Abb. 2.17: 3-D Ansicht des Modells mit einem Lautsprecher und Reflektoren [20]

Die Software optimierte dabei die Position und Winkellage der Reflektoren, um einen reflexionsfreien Bereich um die Abhörposition herum, zu erreichen. Ferner wurde die Software dazu benutzt, um die Reflexionen bis 20 ms vorhersagen zu können. Die Messungen zeigten, dass es möglich war, eine reflexionsfreie Umgebung um den Abhörplatz herum, zu schaffen. Die Messungen wurden mit einem MLSSA (Maximum Length Sequence System Analyzer) Gerät durchgeführt. [20]

2.5.7.2 Active Listening Room Simulator-Teil 2

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Setup des zuvor beschriebenen ersten Teils um einen zweiten Lautsprecher erweitert. Die Stereokonfiguration, sowie die Lage der Reflektoren und die damit verbundene reflexionsfreie Umgebung, erfolgte wieder mittels der Computersoftware CATT Acoustics®. Abbildung 2.18 zeigt die durch die Software erstellte dreidimensionale Ansicht des Raums mit zwei Lautsprechern und Reflektoren. [21]

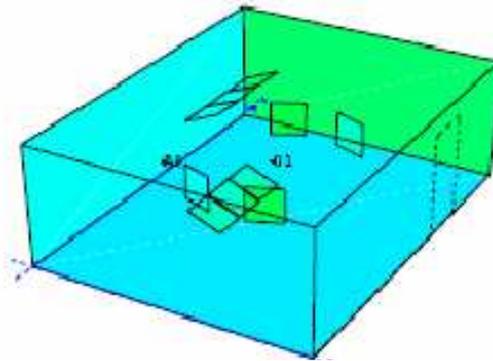


Abb. 2.18: 3-D Ansicht des Modells mit zwei Lautsprechern und Reflektoren [21]

A0 = linker Lautsprecher; 01 = Abhörposition

2.5.7.3 Active Listening Room Simulator-Teil 3

Im dritten und letzten Teil der Arbeit wurde das Setup von der zuvor beschriebenen Stereokonfiguration auf fünf Lautsprecher (L, C, R, RS, LS) und 16 DML Reflektoren erweitert. Die 5 Kanal Surround Konfiguration, sowie die Lage der Reflektoren und die damit verbundene reflexionsfreie Umgebung, erfolgte wieder mittels der Computersoftware CATT Acoustics®. Abbildung 2.19 zeigt die durch die Software erstellte dreidimensionale Ansicht des Raums mit fünf Lautsprechern und Reflektoren. [22]

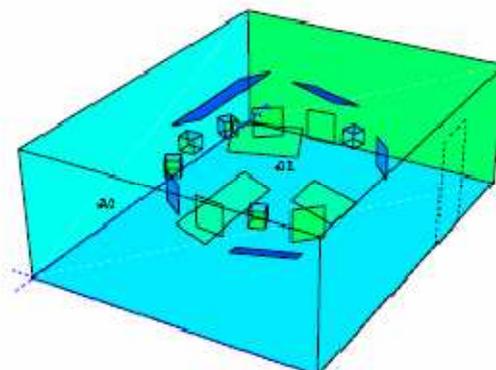


Abb. 2.19: 3-D Ansicht des Modells mit fünf Lautsprechern und Reflektoren [22]

A0 = linker Lautsprecher; 01 = Abhörposition

Folglich wurde ein Model entworfen, welches die idealen Reflexionswege erstellt. Damit verbunden, lassen sich die jeweiligen Positionen der einzelnen DML Reflektoren errechnen. Abbildung 2.20 zeigt dieses Strahlendiagramm. [22]

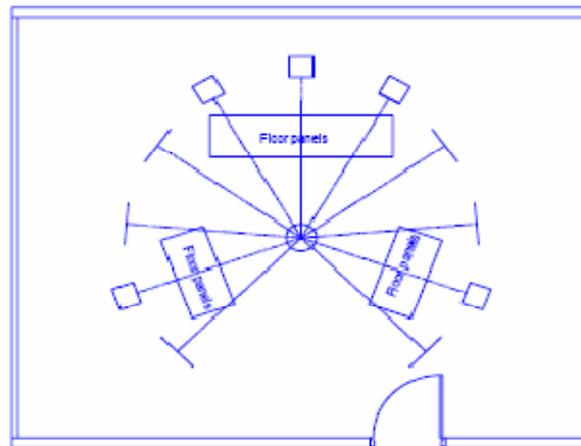


Abb. 2.20: Strahlendiagramm für die Anordnung der Reflektoren [22]

2.6 Verweis auf die Basis dieser Arbeit

Als Grundlage meiner Arbeit dient die Projektarbeit „Specification of a Standardized Listening Room for an Expert Listening Panel“ [23] von Andrea Sereinig, die sich mit der raumakustischen Simulation des hier zu behandelten Hörprobenraumes beschäftigt.

Da dieser Abhörraum eigentlich für das Obergeschoss geplant wurde, stimmen die Abmessungen der Grundfläche und die Raumdimensionen nicht exakt mit denen bei der Simulation überein. Diese Tatsache störte den Bauprozess insofern wenig, weil die neuen/wahren Abmessungen sehr ähnlich ausfielen, als wie bei der ursprünglichen Planung angenommen. Die Forderung laut ITU-R BS 1116-1 [16] Standard, dass ein Mehrkanalwiedergaberaum größer 30 m² sein sollte, wurde hiermit ebenfalls realisierbar.

Einzig der Punkt der günstigen Seitenverhältnisse musste nochmals kontrolliert, und womöglich eine Korrektur der Grenzen für die optimale Nachhallzeit vorgenommen werden.

Ein neuer Plan des Grundrisses sowie die aktuellen Raumdimensionen werden unter Punkt 4.2 angeführt.

Mit den Simulationsergebnissen ihrer Arbeit und zusammen mit meinen Messungen entstand ein qualitativ hochwertiger und moderner Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz.

3 Ergebnisse der raumakustischen Simulation

Dieses Kapitel liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse der raumakustischen Simulation nach dem Standard ITU-R BS 1116-1 [16]. Es werden die zur Konstruktion und zur Feinabstimmung des Raumes notwendigen Parameter aufgelistet. Neben den Basiswerten wie Raumgröße oder günstiges Seitenverhältnis sind auch die Nachhallzeit, das Klarheitsmaß und weitere raumakustische Größen angegeben. Die Simulation wurde von Andrea Sereinig im Zuge ihrer Toningenieursprojektarbeit „Specification of a Standardized Listening Room for an Expert Listening Panel“ [23] mit der Software CATT Acoustic® durchgeführt.

Als zusätzliche Variante der Simulation wurde noch ein Raummodell entworfen, bei dem in der Decke ein Absatz vorhanden ist. Dieses Modell wurde deshalb simuliert, falls eine Begradigung der Decke nicht möglich gewesen wäre. Da schlussendlich der Raum ohne diesen Absatz gebaut wurde, halte ich es nicht für nötig diese Ergebnisse nochmals anzugeben und verweise hiermit auf die bereits oben genannte Arbeit von Andrea Sereinig [23].

3.1 Raumgeometrie und Simulationsmodell leerer Raum

Das Ziel der Simulation sollte sein, einen nach dem ITU-R BS 1116-1 [16] Standard entworfenen Raum zu konzipieren, der in all seinen Punkten dieser Empfehlung entspricht.

Grundfläche/Form

Mit einer Grundfläche von ca. 30 m² war man bei diesem Raum hart an der Grenze zu den Forderungen, dass ein Mehrkanalwiedergaberaum größer 30 m² sein sollte (siehe Punkt 2.4.2.1). Auch die Tatsache, dass der Raum nicht rechteckig oder trapezförmig ist, machte die Planung nicht leichter.

Raumdimensionen

Das Einhalten der passenden Seitenverhältnisse laut ITU Standard [16] war sehr schwierig, wodurch man sich mit gewissen Annäherungen behelfen musste. Die Breite wurde mit $w=5$ und die Länge mit $l=6$ m angenommen. Die Höhe des Raumes beträgt $h_m=2.75$ m.

Gemäß Vorgabe unter dem Punkt 2.4.2.1 sollten nun die günstigen Seitenverhältnisse sein:

$$1.1 * w / h_m \leq l / h_m \leq 4.5 * w / h_m - 4$$
$$1.1 * w / 2.75 \leq 6 / 2.75 \leq 4.5 * 5 / 2.75 - 4$$

$$\underline{2 \leq 2,182 \leq 6,25}$$

wobei:

l : Länge; w : Breite, h_m : Höhe.

Des Weiteren sollten die Bedingungen $l / h < 3$ und $w / h < 3$ eingehalten werden.

Mit den oben getroffenen Annäherungen wurden all diese Kriterien erfüllt und eingehalten.

Nachhallzeit

Das Volumen des zu simulierenden Raumes betrug laut CATT Acoustic® ca. $V=83 \text{ m}^3$. Das V_0 in der Formel darunter repräsentiert das Bezugsvolumen von 100 m^3 . Die mittlere Nachhallzeit beträgt daher:

$$T_m = 0.25 (V / V_0)^{1/3} [\text{s}]$$

$$T_m = 0.25 (83/100)^{1/3} = \underline{0.235 \text{ s}}$$

Die Grenze für die mittlere Nachhallzeit über den betrachteten Frequenzbereich gemäß ITU-R BS 1116-1 [16] lautet deshalb:

$$\underline{0.185 \text{ s} < T_m < 0.285 \text{ s}}$$

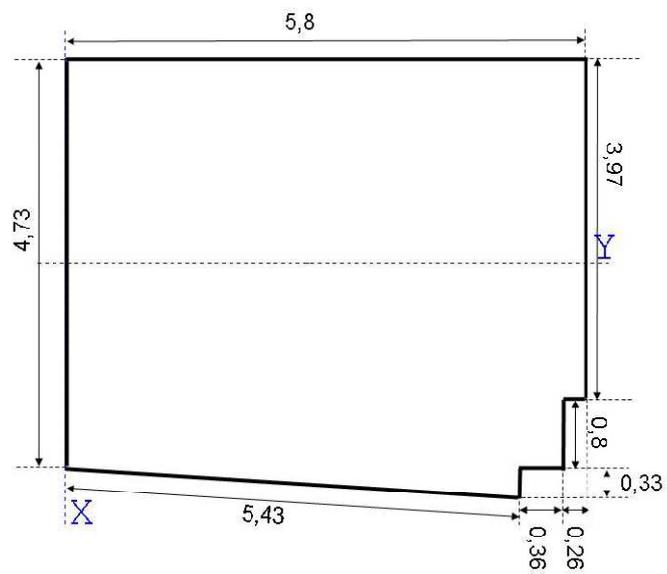


Abb. 3.1: Grundriss Hörprobenraum Simulation [23]



Abb. 3.2: Fotos vom leeren Raum [23]

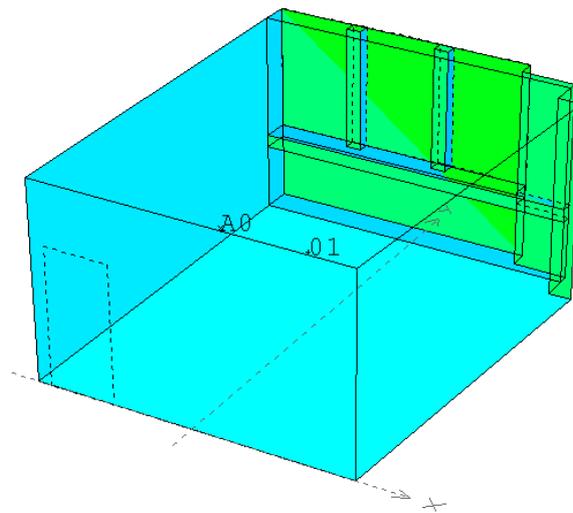


Abb. 3.3: 3D Modell des leeren Hörprobenraumes [23]

3.2 Raumakustisch optimierter Raum

3.2.1 Absorbertypen

Um die Akustik des Raumes zu verbessern wurden mehrere Materialien ausprobiert und zusätzlich in das Modell eingebaut und simuliert.

Breitband – und Tieffrequenzabsorber

Passende Absorber für die Wände fand man bei der Österreichischen Firma ‘TriKustik’ (www.trikustik.at). Die Absorptionskoeffizienten für das Modell R32D8 werden in der darauffolgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 3.1: Absorptionskoeffizienten des TriKustik Breitbandabsorbers R32D8 [23]

f [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α	0.5	0.62	0.6	0.5	0.3	0.22

Tab. 3.2: Absorptionskoeffizienten des Tieffrequenzabsorber [23]

f [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α	0.91	0.77	0.45	0.25	0.14	0.14

Akustikvorhang

Um die reflektierende Wirkung der Fenster abzuschwächen wurden sie mit einem Akustikvorhang der deutschen Firma 'mbakustik' (www.mbakustik.de) abgehängt. Unten sehen sie wieder die Absorptionskoeffizienten des Modells AV12:

Tab. 3.3: Absorptionskoeffizienten des Akustikvorhanges AV12 [23]

f [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α	0.03	0.3	0.75	0.76	0.76	0.78

Anm.: Es wurde schlussendlich ein anderer Vorhang mit ähnlichen Absorptionskoeffizienten verwendet.

Akustikdecke

Die Reflexionen der Decke bekam man mit einem Deckensystem der Firma KNAUF GmbH (www.knauf.at) unter Kontrolle. Das für die Simulation verwendete Modell trägt die Bezeichnung 'Plaza Micro M1', dessen Absorptionskoeffizienten in der Tabelle 3.4 aufgelistet werden.

Tab. 3.4: Absorptionskoeffizienten der Akustikdecke "Plaza Micro M1" [23]

f [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α	0.40	0.50	0.65	0.60	0.60	0.55

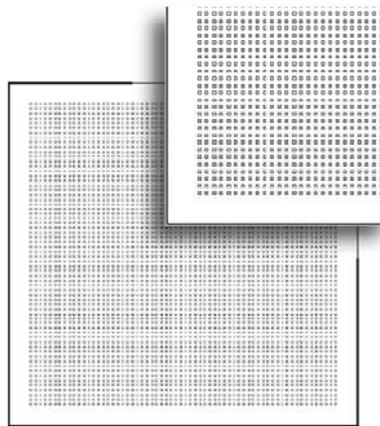


Abb. 3.4: Beispielfoto für ein Deckenelement des Typs "Plaza Micro M1" von KNAUF [23]

3.2.2 Absorberpositionen

In den Abbildungen 3.5 ff werden die genauen Positionen der Absorber und der Einrichtungsgegenstände dargestellt, die zum Erreichen der geforderten Nachhallzeiten laut ITU-R BS 1116-1 [16] geführt haben.

Gelb	Breitbandabsorber von Triakustik
Blau	Tieffrequenzabsorber
Orange	Akustikvorhang vor den Fenstern
Rot	Teppich unter dem Probandentisch
Türkis	schwimmender Estrich – Boden
Lila	Probanden – und Supervisorstisch

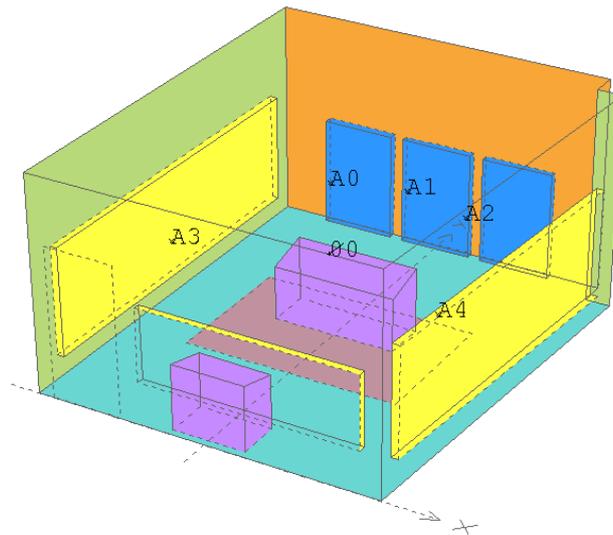


Abb. 3.5: 3D Ansicht des vollständig bestückten Hörprobenraumes [23]

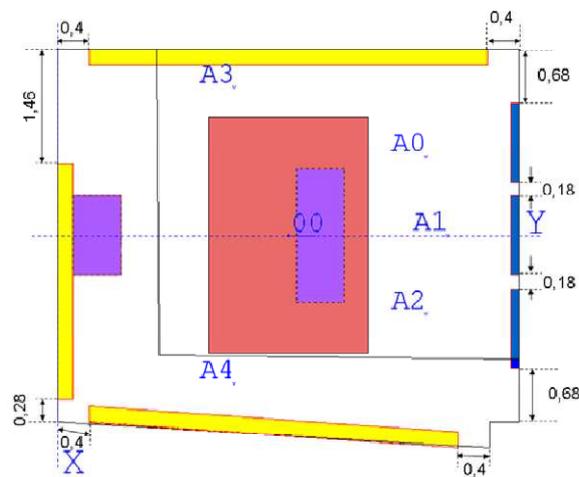


Abb. 3.6: Grundriss des optimierten Raumes [23]

Kalibrierung

Da die genauen Absorptionswerte der Teilflächen des leeren Raumes nicht bekannt waren, musste durch eine zusätzliche Messung das Simulationsmodell kalibriert/angepasst werden, damit der Urzustand des realen Hörprobenraumes auch dem Ausgangsmodell der Simulation entsprach.

Man passte also einige Simulationsparameter wie z.B. Absorptionskoeffizienten der einzelnen Bauteile in geringem Maße an die Ergebnisse der Messung an.

Klarheitsmaß

Zur Kalibrierung des Klarheitsmaßes wurde die Diffusität in der Simulation leicht verändert, bis sie in zufriedenstellender Übereinstimmung mit den Messwerten lag. Zu sehen sind diese Werte in der letzten Spalte der Nachhallzeitentabelle in Tab. 3.6. Trotz dieser Anpassung kam es in den beiden tiefen Oktavbändern (125Hz und 250Hz) zu Abweichungen. In der Simulation war die Kalibrierung der teilweise recht hohen Messwerte in den unteren Frequenzen nicht möglich und so musste man diese beiden Punkte speziell im Auge behalten.

Tab. 3.5: Vergleich des Klarheitsmaßes C80 zwischen Messung und Simulation

f [Hz]	Messung für die Kalibrierung	Simulation leerer Raum ohne Absatz (Simulation)
125	5.38	2.8
250	3.44	1.1
500	0.24	-0.2
1000	-0.59	-0.8
2000	-0.63	-0.7
4000	0.21	0.5

An dieser Stelle gilt es vielleicht zu erwähnen, dass das Klarheitsmaß für solch „kleine“ Räume nicht wirklich aussagekräftig ist, da dessen Werte bereits im leeren Raum gut ($-3\text{dB} < C_{80}$) sind.

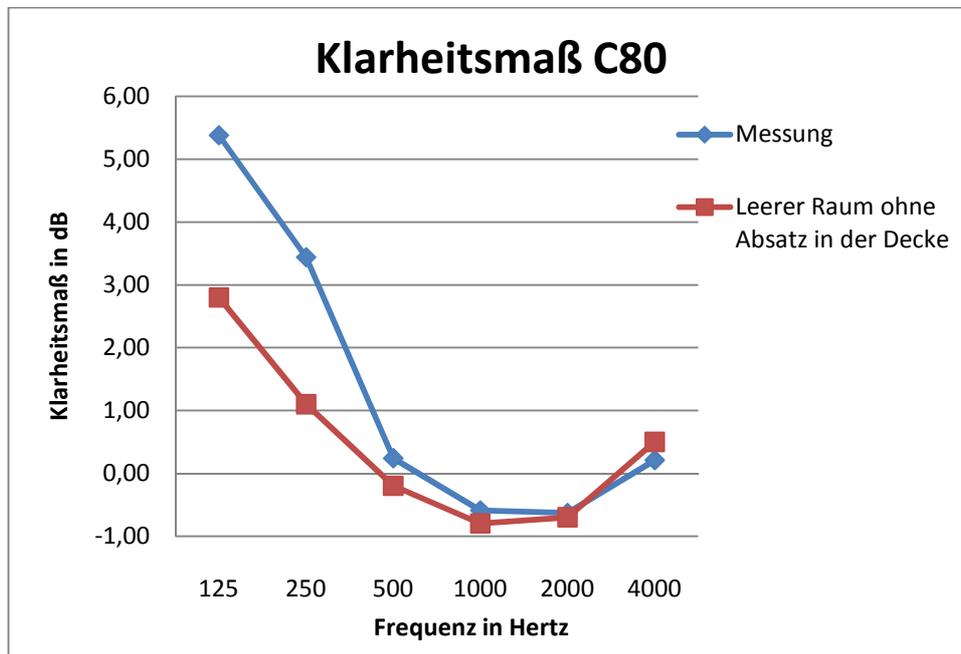


Abb. 3.9: Diagramm Klarheitsmaß C80

Nachhallzeit

Um die Nachhallzeiten in der Simulation an die gemessenen Zeiten anzupassen wurden die Messwerte als Referenz in CATT Acoustic® eingegeben. Durch Veränderung der Absorptionskoeffizienten der Wände und des Bodens wurde eine Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem wahren leeren Raum erreicht.

Tab. 3.6: Nachhallzeiten und Diffusität zur Kalibrierung [23]

	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,11	1,44	1,75	1,96	1,92	1,57	s
EyrTg	1,11	1,44	1,76	1,96	1,92	1,57	s
SabT	1,13	1,46	1,76	1,96	1,92	1,57	s
T-15	1,14	1,47	1,79	1,98	1,98	1,63	s
T-30	1,16	1,47	1,79	1,98	1,99	1,65	s
Tref	1,10	1,40	1,70	1,90	1,90	1,60	s
AbsC	9,28	7,14	5,78	5,00	4,85	5,16	⊘
AbsCg	9,29	7,15	5,78	5,00	4,83	5,15	⊘
MFP	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	m
Diff s	3,02	8,02	14,00	29,99	9,98	4,00	⊘

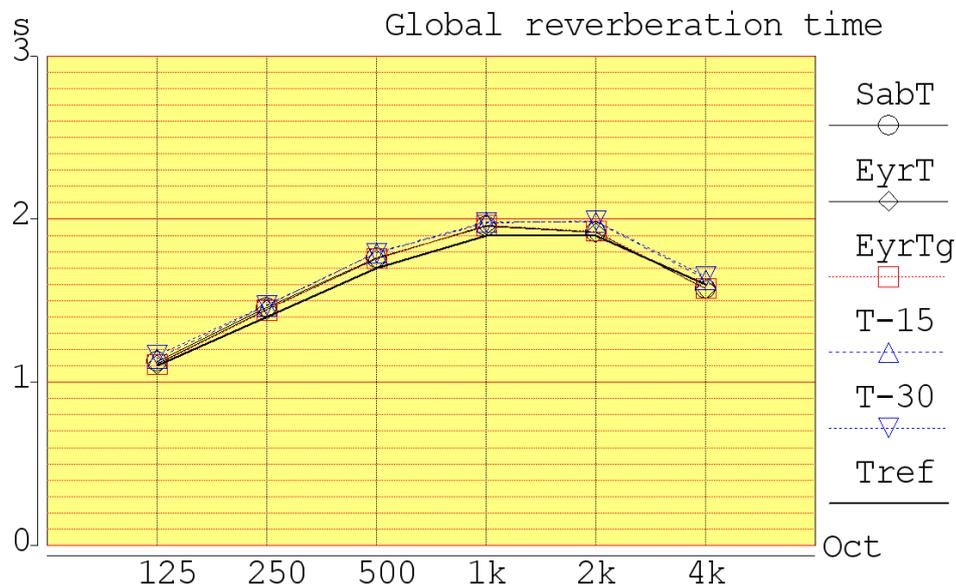


Abb. 3.10: Nachhallzeiten berechnet von CATT [23]

Tref ist bei dieser Grafik die gemessene Nachhallzeit T-30. Man sieht sehr schön die doch recht gute Kalibrierung der Nachhallzeit zwischen Simulationsmodell und Messung.

3.3.2 Optimierter Raum

Nachdem der virtuelle Raum mit den unter Punkt 3.2 gezeigten Akustikmodulen und entsprechenden Materialien ausgestattet wurde, konnten alle geforderten Vorgaben laut ITU-R BS 1116-1[16] Standard erreicht werden.

Einzig bei den Grenzwerten für die Nachhallzeit kam es in den unteren beiden Oktavbändern zu Problemen. Während man beim 250 Hz- Band gerade noch die obere Grenze unterschreiten konnte, so hatte man beim 500 Hz- Band das Problem über der unteren Grenze zu bleiben.

Klarheitsmaß

Die Werte für das Klarheitsmaß sind über den gesamten Frequenzbereich hervorragend. Bei sehr tiefen und sehr hohen Frequenzen fallen sie ein wenig ab, da in diesen Bereichen die Nachhallzeit minimal größer ist. Wie bereits vorhin erwähnt ist die Aussagekraft über das Klarheitsmaß bei einem so kleinen Raum nicht relevant.

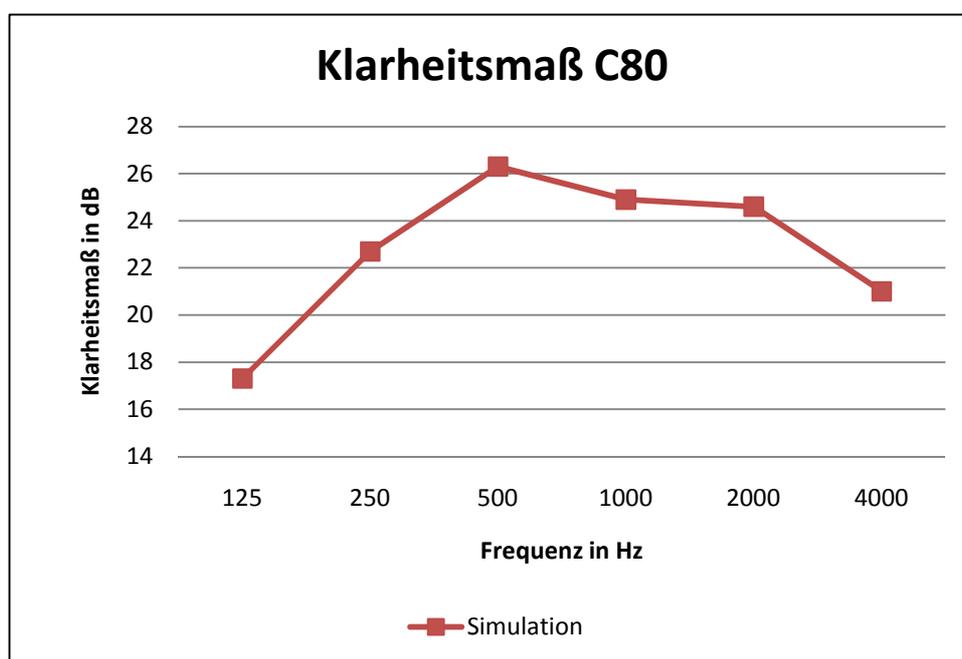


Abb. 3.9: Simulierte Klarheitsmaßwerte (mit Absorbern bestückter Raum)

Tab. 3.5: Simulierte Klarheitsmaßwerte (mit Absorbern bestückter Raum)

f [Hz]	Simulation mit Absorbern bestückter Raum [dB]
125	32.0
250	27.3
500	23.7
1000	23.1
2000	21.9
4000	22.2

Nachhallzeit

Wie oben beschrieben, sieht man die beiden kritischen Bereiche um 250 und 500 Hz. Man konnte gerade noch innerhalb der oberen und unteren Grenze für die Nachhallzeit laut ITU Standard bleiben.

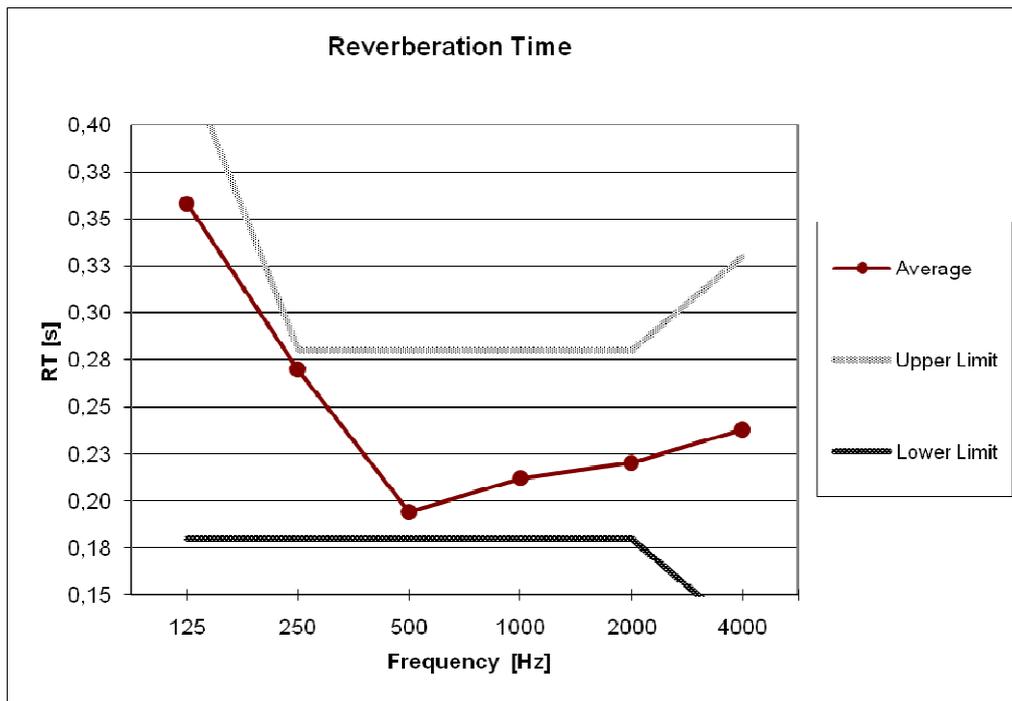


Abb. 3.10: Nachhallzeit des simulierten Raumes

Tab. 3.6: Nachhallzeit des simulierten Raumes

Frequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Nachhallzeit [s]	0,36	0,27	0,19	0,21	0,22	0,24

4 Vermessung der raumakustischen Parameter während des Baus

Um die einzelnen Bauschritte auf ihre raumakustische Wirksamkeit untersuchen zu können wurde nach jeder größeren Veränderung eine Akustische Messung durchgeführt und aufgezeichnet. Mittels der Software WinMLS, welche auf Basis der MLS-Korrelationsmesstechnik arbeitet, wurde die periodische Impulsantwort des Systems gemessen, woraus sich alle weiteren raumakustischen Parameter berechnen ließen.

4.1 Maximum Length Sequence (MLS)

Funktionsweise

Unter Anwendung der Korrelationsmesstechnik und zusammen mit einem reproduzierbaren, energiereichem Signal, dem MLS Signal, wird die Impulsantwort eines Systems bestimmt. Das MLS-Signal ist ein periodisches, binäres Pseudozufallssignal mit der Periodendauer L , welches in ein zweiwertiges, analoges Signal umgesetzt wird. [12]

Das zu messende lineare System wird mit der MLS angeregt, die Systemantwort gemessen und mit dem bekannten Erregersignal gekreuzkorreliert. Man erhält als Ergebnis die periodische Impulsantwort (PIR) des Systems. Durch die anschließende Diskrete Fourier Transformation (DFT) gelangt man zur komplexen, diskreten Übertragungsfunktion, woraus man weitere Parameter berechnen lassen kann. [12]

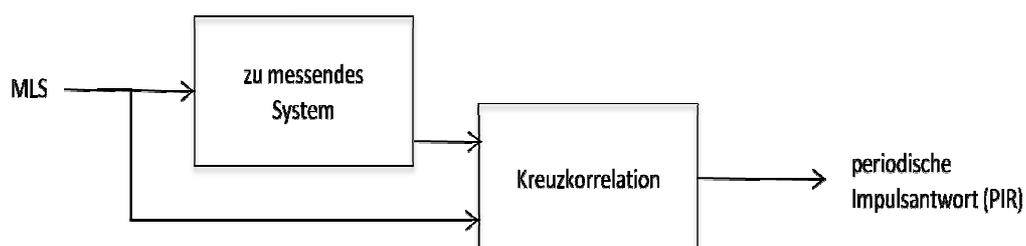


Abb. 4.1: Funktionsweise der MLS-Messung

Erzeugung der MLS

MLS-Signale sind periodische, zweiwertige, pseudozufällige Signale mit der Periodendauer L . Die Folgenlänge L gibt nur die Anzahl der logischen Zustände an. [12]

$$L = 2^m - 1 \quad m \dots \text{Grad des Polynoms}$$

Um zur Periodendauer des MLS-Signals zu gelangen, muss man die Folgenlänge mit der Dauer Δt eines logischen Zustandes multiplizieren. [3]

$$T_{MLS} = L \cdot \Delta t = \frac{L}{f_c} \quad f_c \dots \dots \text{Taktfrequenz des MLS - Signals}$$

Die Frequenzauflösung Δf wird durch die MLS- Ordnung bzw. durch die Folgenlänge L bestimmt. [3]

$$\Delta f = \frac{1}{T_{MLS}} = \frac{f_c}{L}$$

Die Dauer eines MLS- Signals ist bei einer Messung sehr wichtig, da diese mindestens so lang sein muss, wie die geschätzte Nachhallzeit nach Sabine.

Beispiel:

Die geschätzte Nachhallzeit mit der Formel nach Sabine wäre $T_{gesch.} = 1,2 \text{ sec}$. Die MLS mit der Ordnung $m = 16$ hat $L = 65535$ logische Zustände. Mit der Taktfrequenz von 44100Hz erhält man eine Wiedergabedauer der MLS von

$$T_{MLS} = L \cdot \Delta t = \frac{L}{f_c} = \frac{2^{16} - 1}{44100} = 1,486 \text{ sec.}$$

Vorteile der MLS Methode

Der Effektivwert eines MLS-Signals ist unabhängig von der Periode immer gleich 1 und gleicht daher dem Maximalwert des MLS-Signals, wodurch der crest factor ein Minimum wird, also 1. [12]

Ein großer Vorteil der MLS Methode ist jener, dass nicht das Erregersignal selbst einem idealen Impuls gleichen muss, sondern die Autokorrelationsfunktion des Erregersignals.

Wenn man die MLS- Methode mit anderen Messverfahren vergleicht, so ist das MLS-Signal als Erreger das energiereichste, wodurch eine Verbesserung des Signal- Störabstandes sowie ein Dynamikgewinn erreicht wird.

Transiente Signale korrelieren nicht mit dem pseudozufälligen MLS-Signal, wodurch die MLS Messung unanfällig gegen alle natürlichen Störgeräusche wird.

4.2 Neuer Grundrissplan und neue Raumdimensionen

Wie schon unter Punkt 2.6 angesprochen unterscheidet sich der tatsächlich gebaute Raum minimal vom simulierten. Aus diesem Grund wurde folgend ein neuer Grundrissplan mit Maßangaben erstellt. Zusätzlich mussten die für die Erfüllung des ITU Standards wichtigen Parameter wie Größe/Form, Raumdimensionen und Nachhallzeit nochmals überprüft werden.

Grundfläche/Form

Nachdem man bereits beim simulierten Raum mit einer Grundfläche von 30 m^2 genau an der Grenze für die minimale Größe eines Mehrkanalwiedergaberaumes ist, so steht man beim realen Raum wieder vor diesem Problem. Mit einer Länge von $6,80 \text{ m}$ und einer maximalen Breite von $4,4 \text{ m}$ erreicht man auch hier nur schwer die geforderten 30 m^2 .

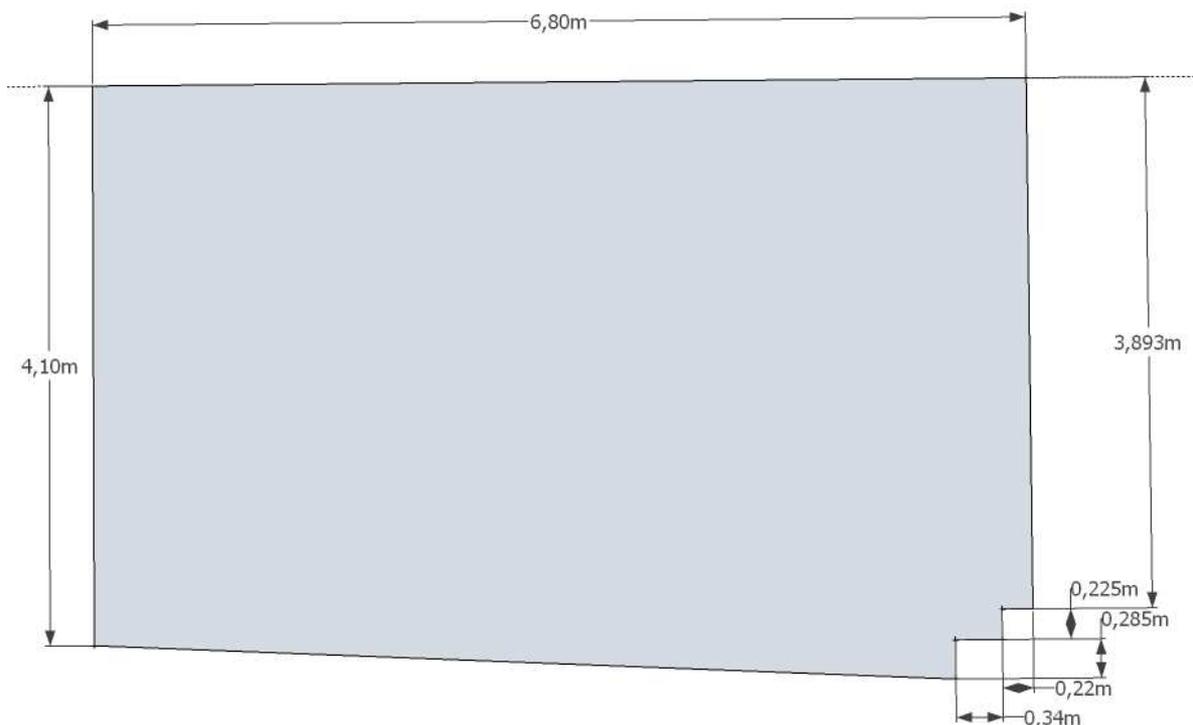


Abb. 4.2: Grundriss des gebauten Raumes

Raumdimensionen

Die Breite wurde mit $w=4.25$ und die Länge mit $l=6.8$ m angenommen. Die Höhe des Raumes beträgt $h_m=3$ m.

Gemäß Vorgabe unter dem Punkt 2.4.2.1 sollten nun die günstigen Seitenverhältnisse sein:

$$1.1 * w / h_m \leq l / h_m \leq 4.5 * w / h_m - 4$$
$$1.1 * 4.25 / 3 \leq 6.8 / 3 \leq 4.5 * 4.25 / 3 - 4$$

$$\underline{\underline{1,56 \leq 2,26 \leq 2,38}}$$

wobei:

l : Länge; w : Breite, h_m : Höhe.

Des Weiteren sollten die Bedingungen $l / h < 3$ und $w / h < 3$ eingehalten werden.

Mit den oben angegebenen Raumdimensionen wurden all diese Kriterien erfüllt und eingehalten.

Nachhallzeit

Mit den Längenangaben von oben beträgt das Volumen des Raumes $V=86,7$ m³. Das V_0 in der Formel darunter repräsentiert das Bezugsvolumen von 100 m³. Die mittlere Nachhallzeit beträgt daher:

$$T_m = 0.25 (V / V_0)^{1/3} [s]$$

$$T_m = 0.25 (86.7/100)^{1/3} = \underline{\underline{0.238 s}}$$

Die Grenze für die mittlere Nachhallzeit über den betrachteten Frequenzbereich gemäß ITU-R BS 1116-1[16] lautet deshalb:

$$\underline{\underline{0.188 s < T_m < 0.288 s}}$$

Man sieht, dass sich die Grenzen für die Nachhallzeit nur minimal vom Simulationsmodell unterscheiden und somit die veränderten Raumdimensionen des neuen Raumes keine große Rolle spielen werden.



Abb. 4.3: Fotos vom neuen leeren Raum

4.3 Messmikrofonanordnung und Quellenpositionen

Um eine flächendeckende Analyse des Raumes durchführen zu können, wurden insgesamt 8 Messmikrofone in einem bestimmten Raster aufgestellt.

Der **Abstand der Mikrofone zur nächsten reflektierenden Oberfläche** sollte dabei mindestens $\lambda/4$ des zu messenden Frequenzbereiches betragen. In unserem Fall handelt es sich um den üblichen Messbereich von ca. 80 Hz bis 16 kHz, wodurch sich für $\lambda/4$ ein Wert von ungefähr **1 m** ergibt. [12]

Des Weiteren sollten **Mikrofonstellungen** mindestens $\lambda/2$ **voneinander entfernt** sein, was einem Minimalabstand von ca. **1,5 m** entspricht. [12]

Die **Höhe der Mikrofone über dem Fussboden** sollte **1,2 m** betragen, entsprechend der Höhe des Ohres eines durchschnittlichen Zuhörers auf typischen Sitzen. [12]

Um den Direktschalleinfluss zwischen Schallquelle und Messmikrofon so gering wie möglich zu halten, sollte der **Minimalabstand** $d_{min} = 0,6 \text{ m}$ nicht unterschreiten. [12]

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}}$$

c....Schallgeschwindigkeit; V....Raumvolumen; T....geschätzte Nachhallzeit

In den folgenden Abbildungen sieht man die Anordnung/Rasterung der 8 Messmikrofone sowie die 6 Positionen der Kugelschallquelle (blaue Würfel).

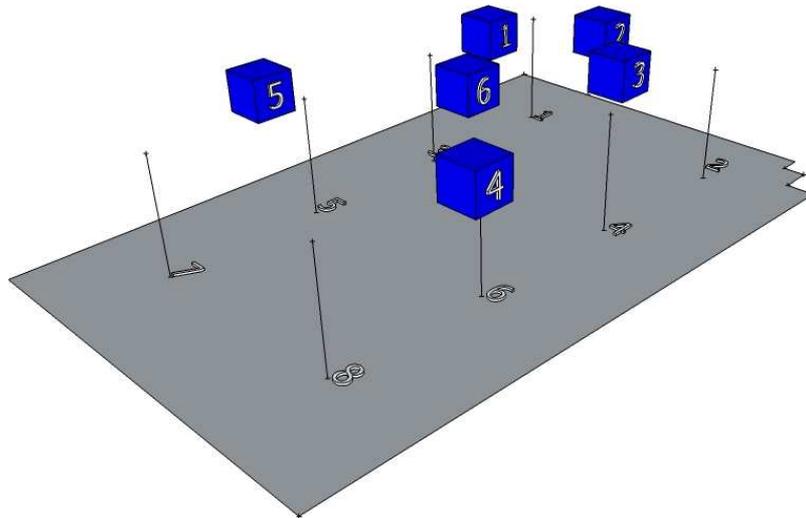


Abb. 4.4: Mikrofonstellungen und Quellenpositionen

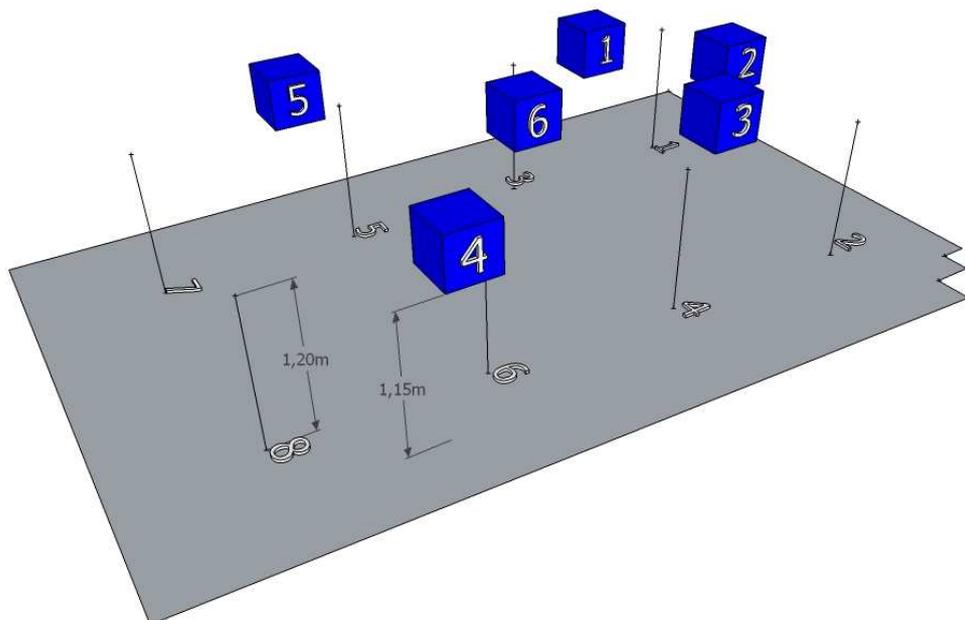


Abb. 4.5: Höhenangaben der Mikrofonstellungen und Quellenpositionen

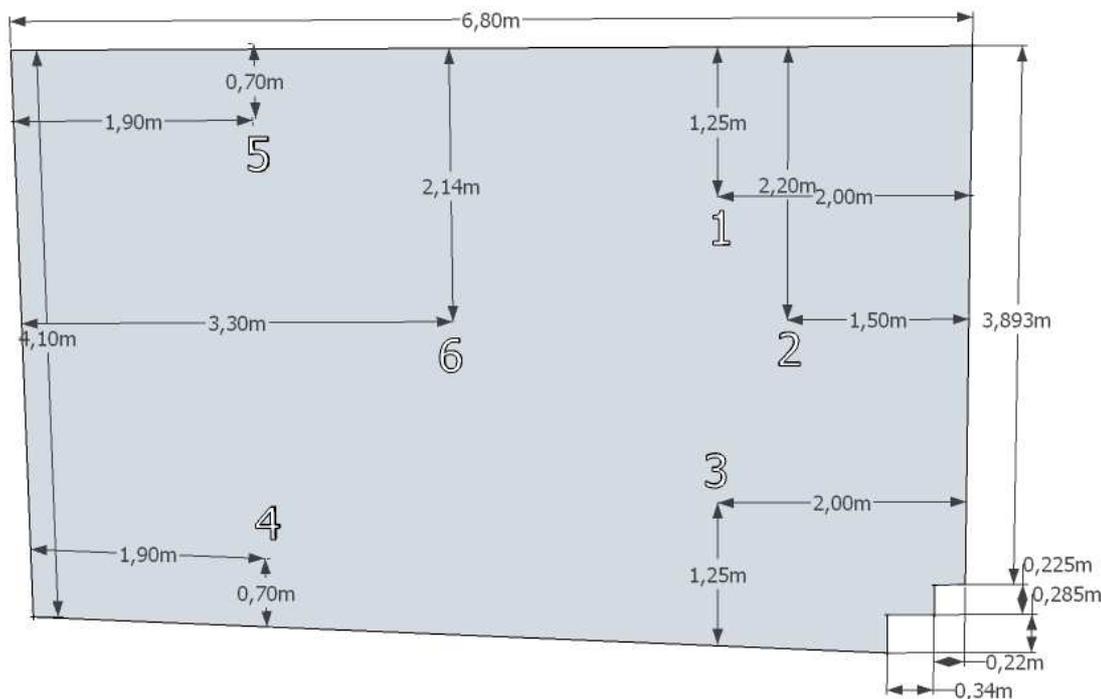


Abb. 4.7: Quellenpositionen mit den exakten Abstandswerten

4.4 Ablauf der Messung

Da beim Messaufbau sowie bei der Messung selbst eine exakte Reproduzierbarkeit gefordert war, mussten die Mikrofonstellungen sowie die Positionen der Quelle genau gekennzeichnet werden, um später die einzelnen Messungen miteinander vergleichen zu können.

Auch bei der Kalibrierung der Messmikrofone des Typs AKG SE 300 B (Richtcharakteristik: Kugel) musste darauf geachtet werden, dass die Aussteuerung der Vorverstärker immer exakt gleich war. Dieser Umstand wurde dadurch gelöst, indem man vor jeder Messung den Mikrofonvorverstärker der einzelnen Kanäle so einstellte, dass bei Anliegen des Kalibratorsignals (93,8dB @ 1000Hz) auf der Software Seite ein Wert von -12dBFS (Full Scale) angezeigt wurde.

Anschließend wurde das durch die Software WinMLS erzeugte MLS Signal mittels der Norsonic 270H Kugelschallquelle (Dodekaeder) und des dazugehörigen Norsonic Power Amplifiers 260 in den Raum eingespeist (der Raum wurde angeregt), die Systemantwort gemessen und die PIR automatisch berechnet.



Abb. 4.8: Messaufbau mit Messsoftware, Vorverstärker und AD/DA Wandler



Abb. 4.9: Norsonic Kugelstrahler und Messmikrofone

Da für die Auswertung und den Vergleich zwischen den verschiedenen Messungen und der Simulation nur die Parameter Nachhallzeit und Klarheitsmaß zur Verfügung standen, beschloss ich bei jeder Messung nur diese beiden Werte als Plot darzustellen, wobei das Klarheitsmaß bei so kleinen Räumen eher wenig aussagekräftig ist.

Es wurde eine Mittelung über die Mikrofonstellungen 3, 4, 5 und 6 durchgeführt, da diese meiner Meinung nach am nächsten zur wahren Abhörposition lagen. Als Quelle wurde willkürlich nur die Position 3 gewählt (Center Lautsprecher), da dieser zwischen dem stereophonen Lautsprecherpaar liegt und somit eine zentrale Abstrahlposition einnimmt.

4.5 Messung 1: Leerer Raum

Ausgangszustand des Raumes

Bei der ersten Messung befand sich der Raum im Rohzustand. Die Seitenwände sowie die Rückwand waren mit Gipskartonplatten doppelt beplankt. Die Decke sowie der Fussboden bestanden aus Beton und die Fenster waren geschlossen.



Abb. 4.10: Fotos vom Raum bei Messung 1

Messprotokoll

Datum:	10.07.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	14:00 – 15:00 Uhr
Temperatur:	19,5°C
Luftfeuchte:	75,3%
Besonderheiten:	Da noch keine Tür vorhanden war, wurde stattdessen eine Pressspanplatte (208cm x 120cm) vor die Türöffnung gestellt. Des Weiteren befand sich noch Arbeitsmaterial wie z.B. Kabelschächte, Kübel etc. im Raum.

Messergebnisse

Mit einer maximalen Nachhallzeit von ca. 2 Sekunden befindet man sich für einen derartigen Raum durchaus im „normalen“ Bereich. Auf den ersten Blick fallen die höheren Werte im Tiefmittenbereich auf, da für diese Frequenzen zu wenig absorbierendes Material im Raum vorhanden war.



Abb. 4.11: Nachhallzeit Messung 1

Die Klarheitsmaßwerte bewegen sich im Bereich von 500 bis 2 kHz unter der 0 dB Grenze was bedeutet, dass in diesem Frequenzbereich die Durchsichtigkeit von Musik und Sprache nicht sehr gut sein wird.

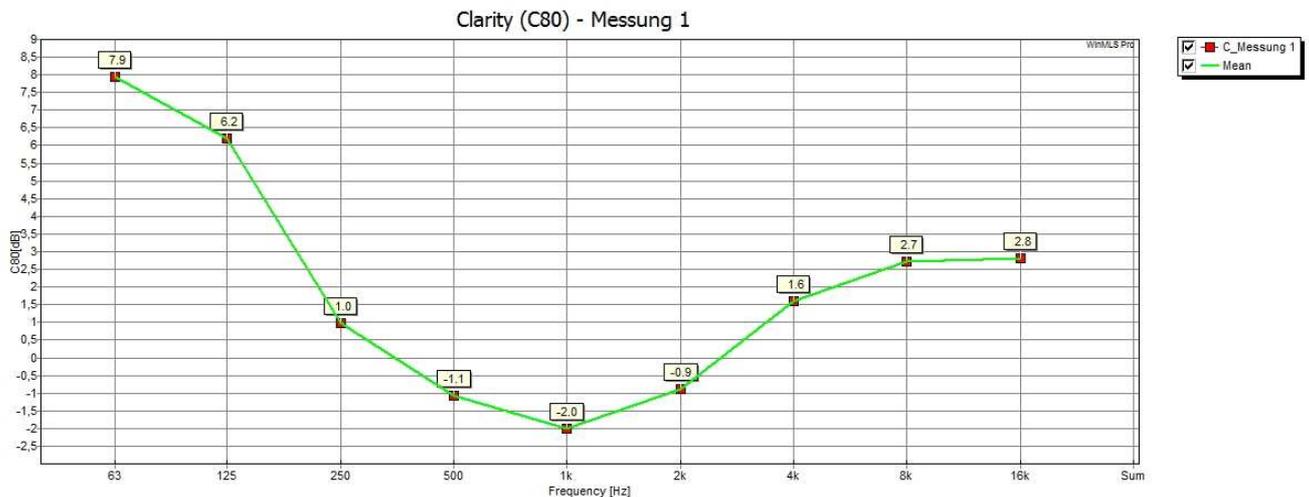


Abb. 4.12: Klarheitsmaß Messung 1

4.6 Messung 2: Boden Grundaufbau

Ausgangszustand des Raumes

Bei der Messung 2 war der Boden bereits im Grundaufbau fertig gestellt. Die Trittschallschutzplatten und die Kabelschächte waren verlegt. Es fehlten noch der schwimmende Estrich und der Bodenbelag. An den Wänden und der Decke hat sich zur vorherigen Messung nichts verändert.



Abb. 4.13: Fotos vom Raum bei Messung 2

Messprotokoll

Datum:	17.07.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	12:30 – 13:00 Uhr
Temperatur:	25,2°C
Luftfeuchte:	65,2%
Besonderheiten:	Da noch keine Tür vorhanden war, wurde stattdessen eine Pressspanplatte (208cm x 120cm) vor die Türöffnung gestellt. Im Boden befanden sich bereits die Kabelschächte und der Grundaufbau war fertig.

Messergebnisse

Im Vergleich zur Messung 1 konnte alleine durch den Grundaufbau des Bodens bereits eine breitbandige Senkung der Nachhallzeit um ca. 0,3 sec erreicht werden. Der Peak im mittleren Frequenzbereich ist noch deutlich ausgeprägt.

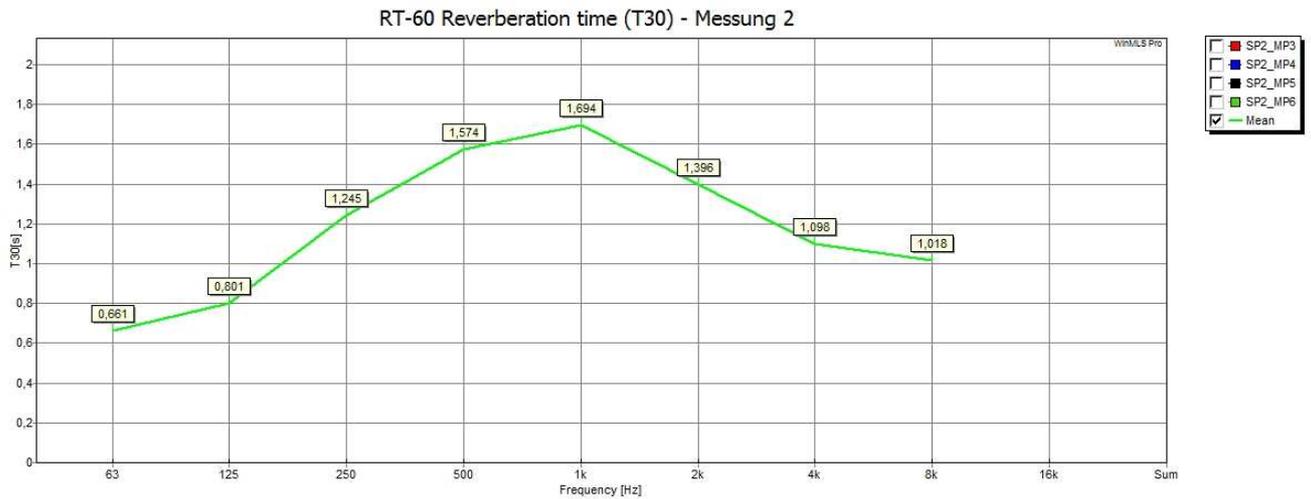


Abb. 4.14: Nachhallzeit Messung 2

Beim Klarheitsmaß hat sich nur sehr wenig getan. Die Werte vom 500 Hz-, 1 kHz- und 2 kHz Oktavband befinden sich noch immer unterhalb der 0 dB Linie.

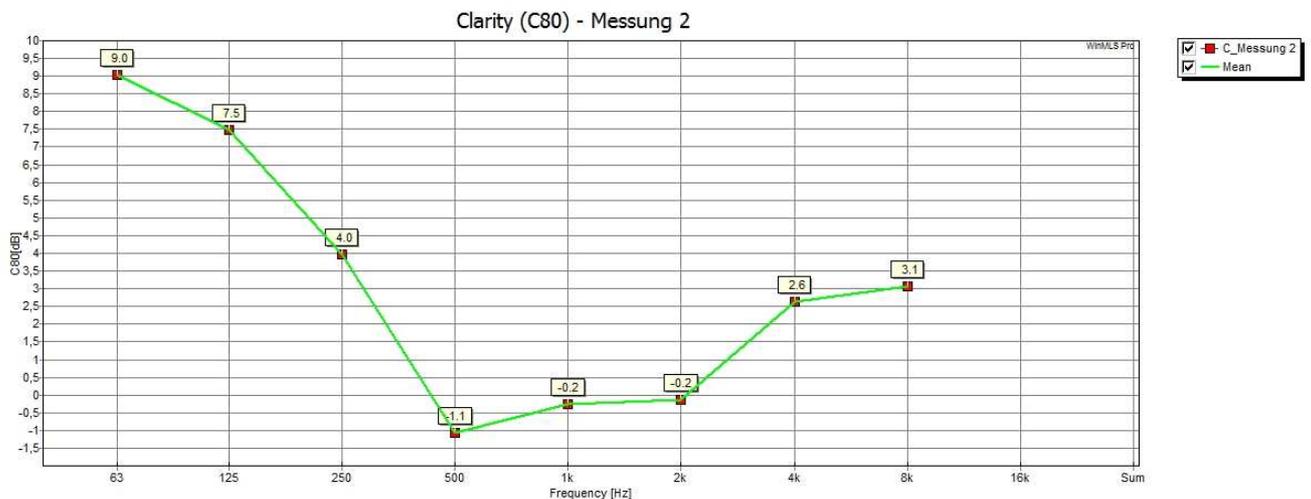


Abb. 4.15: Klarheitsmaß Messung 2

4.7 Messung 3: Akustikdecke und Boden fertig

Ausgangszustand des Raumes

Bei dieser Messung zeigte sich bereits ein deutlicher Unterschied zum vorherigen Ergebnis. Die Akustikdecke wurde eingehängt und die Spots waren alle montiert. Die Wände waren verspachtelt und gestrichen und der Boden war auch fertig verlegt.



Abb. 4.16: Fotos vom Raum bei Messung 3

Messprotokoll

Datum:	01.09.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	10:30 – 11:10 Uhr
Temperatur:	22,3°C
Luftfeuchte:	59,0%
Besonderheiten:	Da noch keine Tür vorhanden war, wurde stattdessen eine Pressspanplatte (208cm x 120cm) vor die Türöffnung gestellt. Der Boden war fertig aufgebaut. Die Akustikdecke war eingehängt. Die Spots waren alle verbaut, jedoch fehlten noch die großen runden Lampen.

Messergebnisse

Nun sieht man schon recht deutlich eine Verbesserung der Nachhallzeit gegenüber den beiden vorherigen Messungen. Durch die Akustikdecke schaffte man beinahe eine ganzheitliche Halbierung der Nachhallzeiten. Man ist bereits im gesamten Frequenzbereich unter der 0,9 sec Grenze und dies alleine durch die raumakustische Optimierung der Decke!

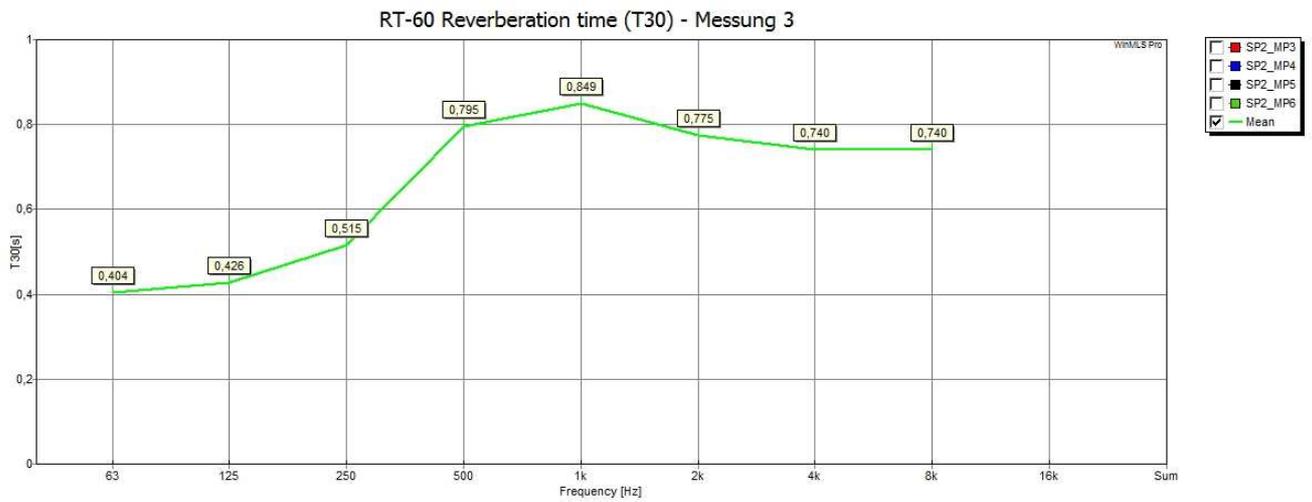


Abb. 4.17: Nachhallzeit Messung 3

Auch das Klarheitsmaß hat sich nun das erste Mal entscheidend verbessert und ist deutlich in den Bereich über 0 dB angestiegen. Ab 500 Hz sind die Werte jedoch geringer, als jene bei den tiefen Frequenzen. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass noch sehr wenig Hochfrequenzabsorber wie z.B. ein Akustikvorhang in den Raum eingebracht wurden.

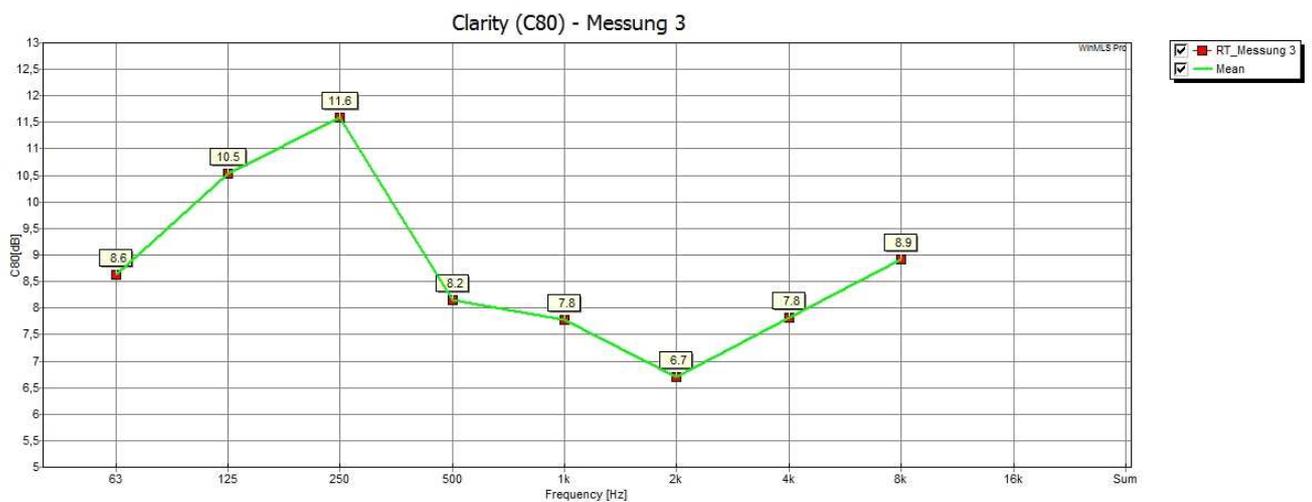


Abb. 4.18: Klarheitsmaß Messung 3

4.8 Messung 4: Akustikvorhang und Türe

Ausgangszustand des Raumes

Vor der Fensterwand hing nun der Akustikvorhang, welcher für die Messung ganz zugezogen wurde. Eine Tür war nun ebenfalls eingebaut. Da die Kabel für die Messung aber irgendwie in den Raum geführt werden mussten, wurde die Tür nur angelehnt und nicht geschlossen. Die restlichen Lampen waren auch fertig installiert.



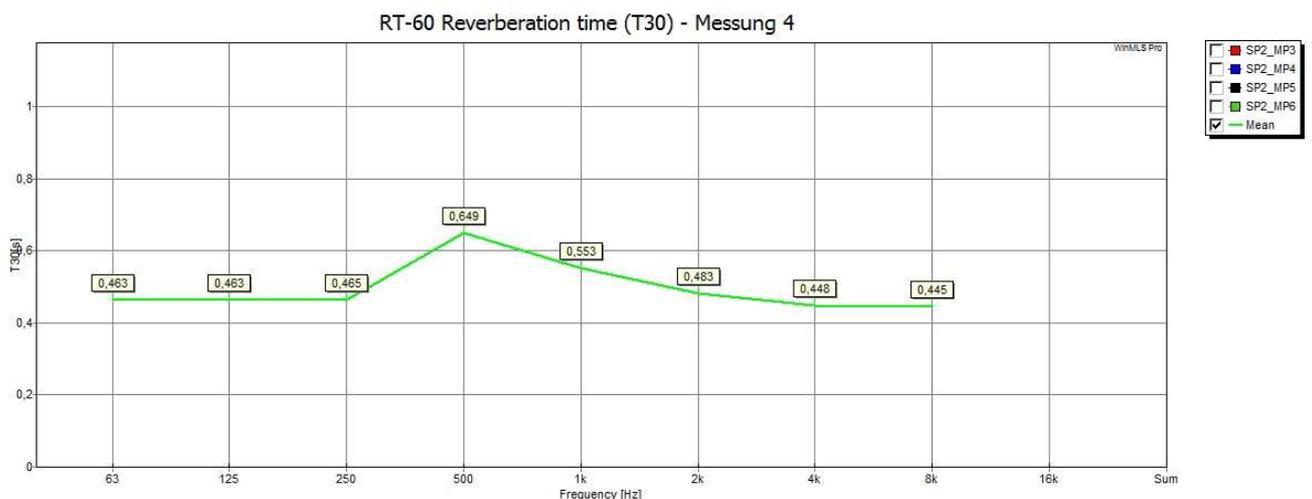
Abb. 4.19: Fotos vom Raum bei Messung 4

Messprotokoll

Datum:	28.09.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	10:30 – 11:15 Uhr
Temperatur:	20,2°C
Luftfeuchte:	60,4%
Besonderheiten:	Eine Tür war nun eingebaut. Da die Kabel für die Messung aber in den Raum geführt werden mussten, konnte die Tür nur angelehnt werden. Der Akustikvorhang war auch da und wurde für die Messung zugezogen. Alle Lampen waren installiert.

Messergebnisse

Bei den Ergebnissen von Messung 4 erkennt man sehr gut die Auswirkungen des Akustikvorhanges. Die Nachhallzeitwerte im mittleren und hohen Frequenzbereich konnten nochmals um ca. 0,3 sec gesenkt werden. Ein schon sehr ausgewogener Kurvenverlauf ist die Folge.

**Abb. 4.20: Nachhallzeit Messung 4**

Auch beim Klarheitsmaß sieht man die positiven Auswirkungen des Akustikvorhanges vor allem oberhalb von 500 Hz. In diesem Bereich konnte ein Anstieg der Werte um rund 4 dB erzielt werden. Des Weiteren kann man auch hier einen einheitlicheren Verlauf der Messwerte erkennen.

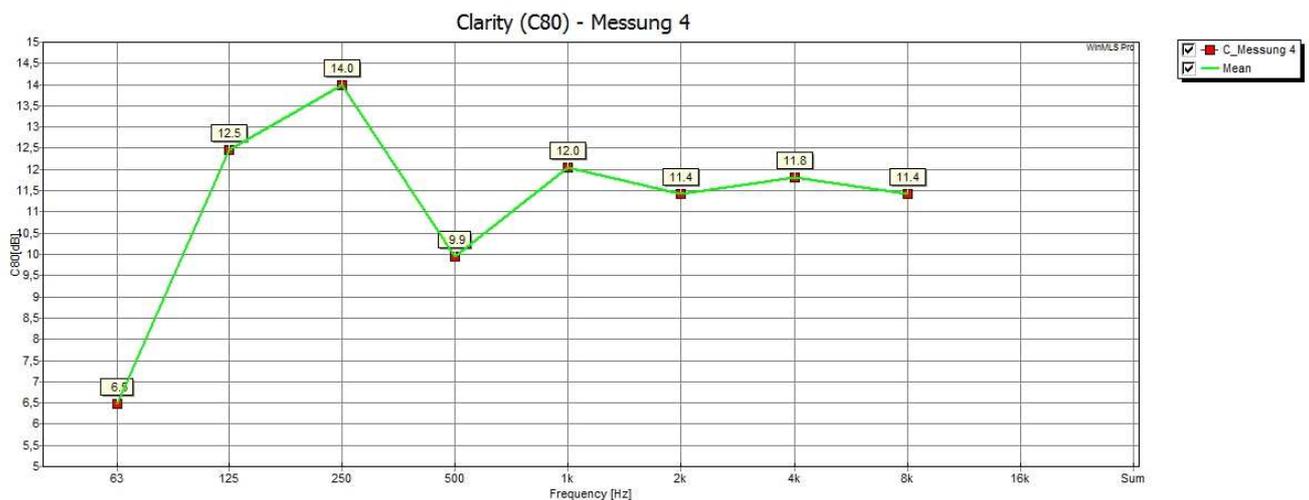


Abb. 4.21: Klarheitsmaß Messung 4

4.9 Messung 5: Linke Wand mit Absorber und Möbel

Ausgangszustand des Raumes

Nachdem die bestellten Absorber eingetroffen waren, wurde zuerst die linke Wand (Sichtweise Richtung Fensterwand) mit 5 Breitbandabsorbern bestückt. Die 2 maßgeschneiderten Tische stellte man auf ihre dafür vorgesehenen Positionen. Einer wurde dabei in der Mitte des Raumes positioniert und der andere nahm an der Rückwand (Türwand) seinen Platz ein.



Abb. 4.22: Fotos vom Raum bei Messung 5

Messprotokoll

Datum:	29.10.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	16:00 – 16:40 Uhr
Temperatur:	22,4°C
Luftfeuchte:	49,9%
Besonderheiten:	Der Akustikvorhang wurde für die Messung ganz zugezogen. Die beiden Tische waren da und standen an ihren Positionen. Auf der linken Wand waren die 5 Breitbandabsorber fertig montiert und regulär gefüllt.

Messergebnisse

Mit der Montage der ersten 5 Breitbandabsorber konnte man sich eine doch noch recht deutliche Verbesserung der Nachhallzeiten über deren relevanten Wirkungsbereich erwarten. Im Schnitt senkten sich die Werte um ca. 0,2 sec. Im tiefen Frequenzbereich bis ca. 150 Hz war die Wirkung der verwendeten Absorber eher gering, da sie auf Grund ihrer Bauweise und Materialien eher für den Bereich über 125 Hz ausgelegt sind.

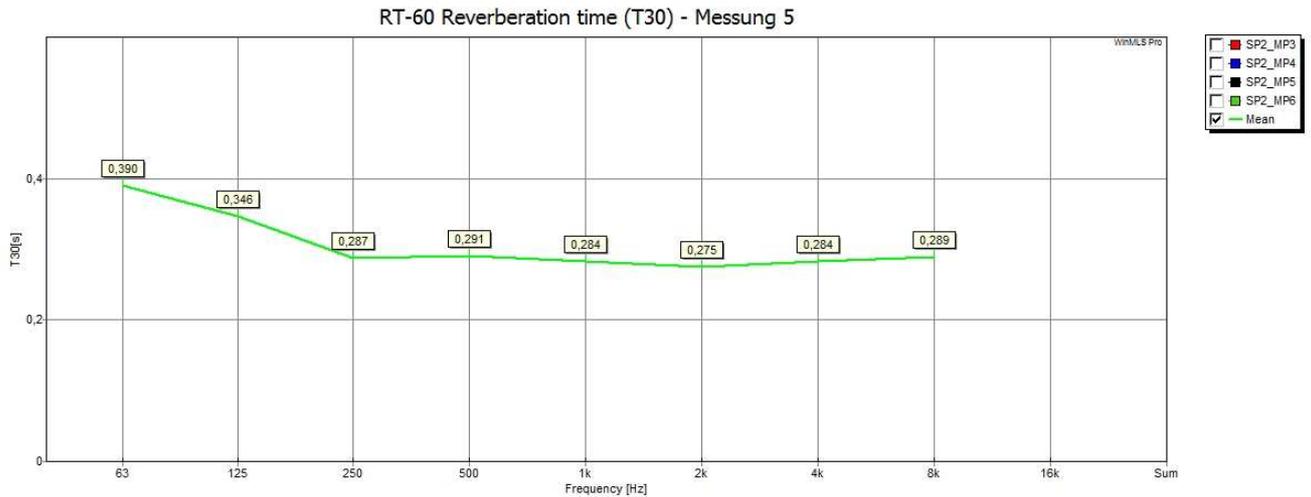


Abb. 4.23: Nachhallzeit Messung 5

Bezüglich des Klarheitsmaßes haben sich alle Werte um ungefähr 6 dB verbessert. Auffällig ist noch der Sprung vom 250 Hz Band zu den darüber liegenden. Da jedoch alle Werte weit über der 0 dB Grenze liegen, muss man sich diesbezüglich keine weiteren Gedanken machen.



Abb. 4.24: Klarheitsmaß Messung 5

4.10 Messung 6: Rechte Wand mit Absorber und Möbel

Ausgangszustand des Raumes

Nachdem bei Messung 5 die linke Seitenwand mit Absorbern bestückt wurde, kam diesmal die rechte Seitenwand dazu. Ansonsten hat sich im Vergleich zur vorherigen Messung nichts verändert.



Abb. 4.25: Fotos vom Raum bei Messung 6

Messprotokoll

Datum:	03.11.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	12:00 – 12:40 Uhr
Temperatur:	22,3°C
Luftfeuchte:	30,6%
Besonderheiten:	Der Akustikvorhang wurde für die Messung ganz zugezogen. Die beiden Tische standen an ihren Positionen. Auf der linken und rechten Wand waren die Breitbandabsorber fertig montiert und regulär gefüllt.

Messergebnisse

Durch die Installation von weiteren 5 Absorbern an der rechten Seitenwand konnten die Nachhallzeiten noch weiter gesenkt werden. Ab dem 125 Hz Band befinden sich nun alle Werte zwischen 0,2 und 0,3 Sekunden.

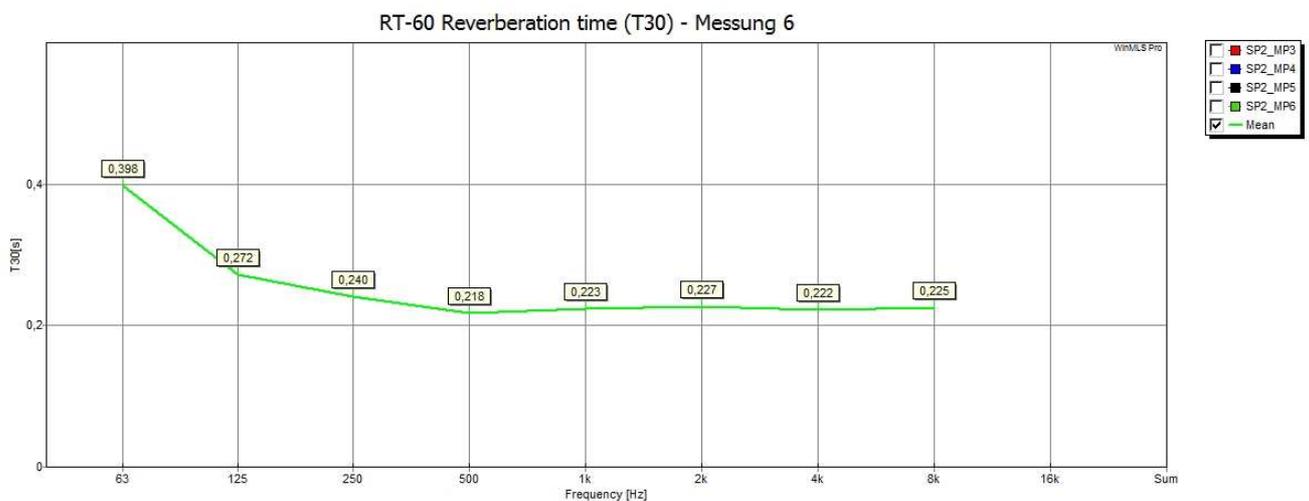


Abb. 4.26: Nachhallzeit Messung 6

Nachdem nun beide Seitenwände mit Absorbern ausgestattet waren, stellte sich auch bezüglich des Klarheitsmaßes ein gleichmäßigerer Verlauf der Kurve ein. Der bei den vorherigen Grafiken erwähnte Sprung beim 250 Hz Band ist nicht mehr so stark ausgeprägt und der Unterschied zwischen den Frequenzbändern von maximal ca. 4 dB (125Hz bis 8kHz) ist auch ganz okay.

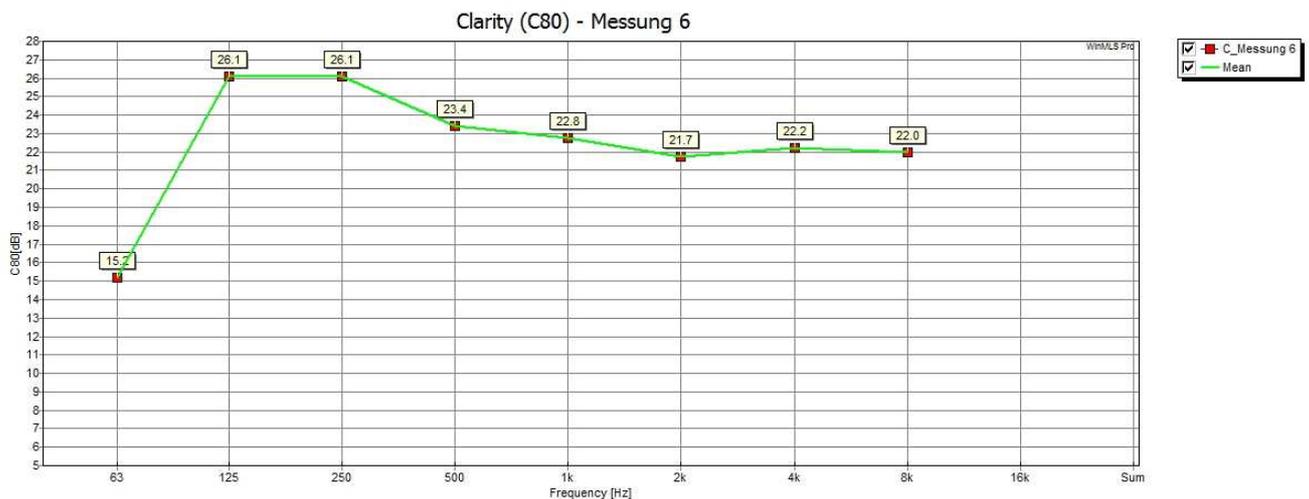


Abb. 4.27: Klarheitsmaß Messung 6

4.11 Messung 7: Absorber hinten montiert

Ausgangszustand des Raumes

Einer der letzten Schritte bei der Ausstattung des Hörprobenraumes war die Montage der beiden Breitbandabsorber an der Rückwand des Raumes. Auf die Tieffrequenzabsorber vor der Fensterwand wurde vorerst verzichtet, da man schauen wollte, ob man bereits ohne diese innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt. Bis auf den Teppich unterhalb des Probandentisches (in der Mitte des Raumes) war der Raum somit vollständig akustisch optimiert und ausgestattet.

Alle Absorber waren vollständig gefüllt und der Akustikvorhang war ganz zugezogen.



Abb. 4.28: Fotos vom Raum bei Messung 7

Messprotokoll

Datum:	09.12.2009
Ort:	Hörprobenraum im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz
Messzeit:	12:00 – 13:00 Uhr
Temperatur:	21,4°C
Luftfeuchte:	28,5%
Besonderheiten:	Die Tür war angelehnt. Der Akustikvorhang war zugezogen. Die beiden Tische standen an ihren Positionen. Auf der linken und rechten Wand waren die Breitbandabsorber fertig montiert und regulär befüllt. Auf der Rückseite waren 2 Breitbandabsorber auf die Wand montiert.

Messergebnisse

Nach Anbringen der beiden letzten Breitbandabsorber an der Rückwand des Raumes ließ sich nur mehr eine geringe Verbesserung der Nachhallzeiten feststellen. Schaut man sich jetzt die Toleranzgrenzen der Nachhallzeit bezüglich des Durchschnittswertes T_m laut ITU Standard (Kapitel 4.2) an, so kann man erkennen, dass die Werte ideal im vorgegebenen Bereich liegen (siehe auch Abb. 5.4).

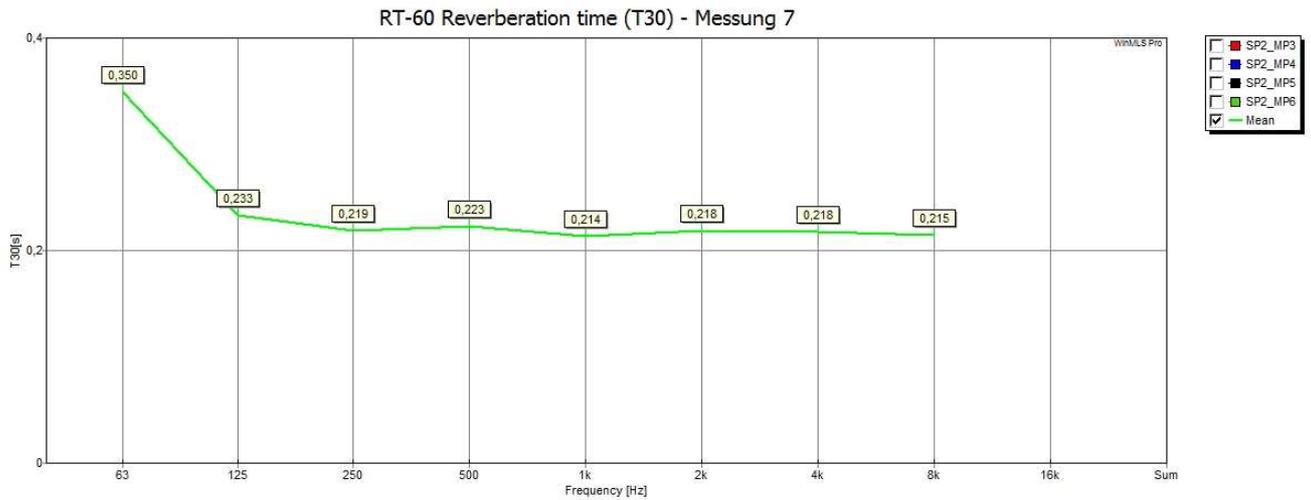


Abb. 4.29: Nachhallzeit Messung 7

Vergleicht man die unten abgebildete Grafik vom Klarheitsmaß mit jener aus Messung 6, so lässt sich erkennen, dass nur mehr in den drei tiefsten Frequenzbändern eine nennenswerte Veränderung des Klarheitsmaßes stattgefunden hat. Über den für uns interessanten Frequenzbereich sind die Werte ausgezeichnet und dies bedeutet, dass die Durchsichtigkeit von Musik und Sprache außerordentlich gut sein sollte.

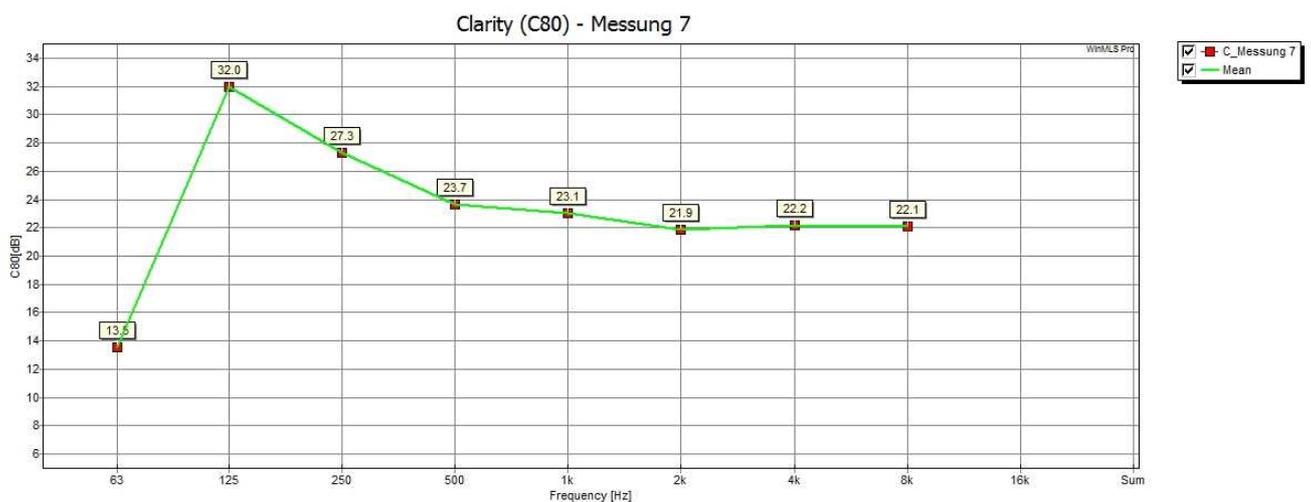


Abb. 4.30: Klarheitsmaß Messung 7

5 Vergleich von Messung und Simulation

Wie schon unter Punkt 2.6 angesprochen, hat der simulierte Raum nicht die exakt gleichen Abmessungen wie der tatsächlich erbaute. Da jedoch das Volumen beinahe das gleiche ist, lohnt sich trotzdem ein Vergleich von Messung und Simulation. Man wird sehen, dass das simulierte Raummodell sehr gut mit dem realen Bau übereinstimmt und dass die virtuelle Simulation bzw. Planung von Räumen einen großen Vorteil gebracht hat.

Da von der Simulation her nur die Ergebnisse für den leeren und den mit allen Absorbern ausgekleideten Raum zur Verfügung stehen, werde ich auch nur diese beiden Fälle kurz gegenüberstellen.

5.1 Vergleich leerer Raum

Vergleich Klarheitsmaß

Die Simulation des leeren Raumes wurde zusammen mit einer zur Kalibrierung notwendigen raumakustischen Messung (siehe Kapitel 3) durchgeführt. Trotz dieser Anpassung kam es beim Klarheitsmaß in den beiden tiefen Oktavbändern (125Hz und 250Hz) zu Abweichungen. In der Simulation war die Kalibrierung der teilweise recht hohen Messwerte in den unteren Frequenzen nicht möglich. Um eine zusätzliche Aussage über die Auswirkungen der veränderten Raumdimensionen zu erlangen, werde ich die Werte der zur Kalibrierung notwendigen Messung ebenfalls in den Vergleich mit aufnehmen.

Die Werte von Messung 1 beziehen sich auf die Ergebnisse der Vermessung der raumakustischen Parameter während des Baus aus Kapitel 4.

Tab. 5.1: Vergleich des Klarheitsmaßes leerer Raum

f [Hz]	Messung für die Kalibrierung [dB]	Simulation leerer Raum ohne Absatz [dB]	Messung 1 [dB]
125	5.38	2.8	6.2
250	3.44	1.1	1.0
500	0.24	-0.2	-1.1
1000	-0.59	-0.8	-2.0
2000	-0.63	-0.7	-0.9
4000	0.21	0.5	1.6

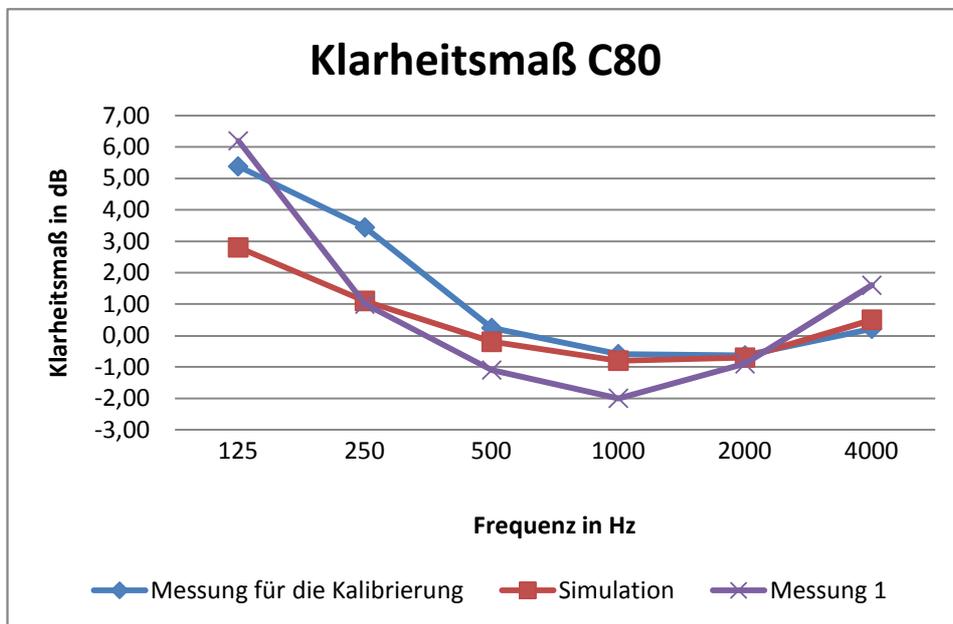


Abb. 5.1: Vergleich Klarheitsmaß

Vergleich Nachhallzeit

Die Nachhallzeitwerte der Simulation konnten durch die Kalibrierung sehr gut aufeinander abgestimmt werden. Durch Veränderung der Absorptionsgrade einzelner Teilflächen wurde ein sehr geringer „offset“ zwischen den Simulationswerten und den zur Kalibrierung notwendigen Messwerten erreicht. Im Vergleich mit dem wahren Raum gibt es kleine Unterschiede in den mittleren und hohen Frequenzen, die sich auf die veränderten Raumdimensionen und den leicht veränderten Oberflächenabsorptionsgraden zurückführen lassen.

Tab. 5.2: Vergleich der Nachhallzeiten leerer Raum

f [Hz]	Messung für die Kalibrierung [s]	Simulation leerer Raum ohne Absatz [s]	Messung 1 [s]
125	1.10	1.16	1.07
250	1.40	1.47	1.61
500	1.70	1.79	2.02
1000	1.90	1.98	1.98
2000	1.90	1.99	1.68
4000	1.60	1.65	1.21

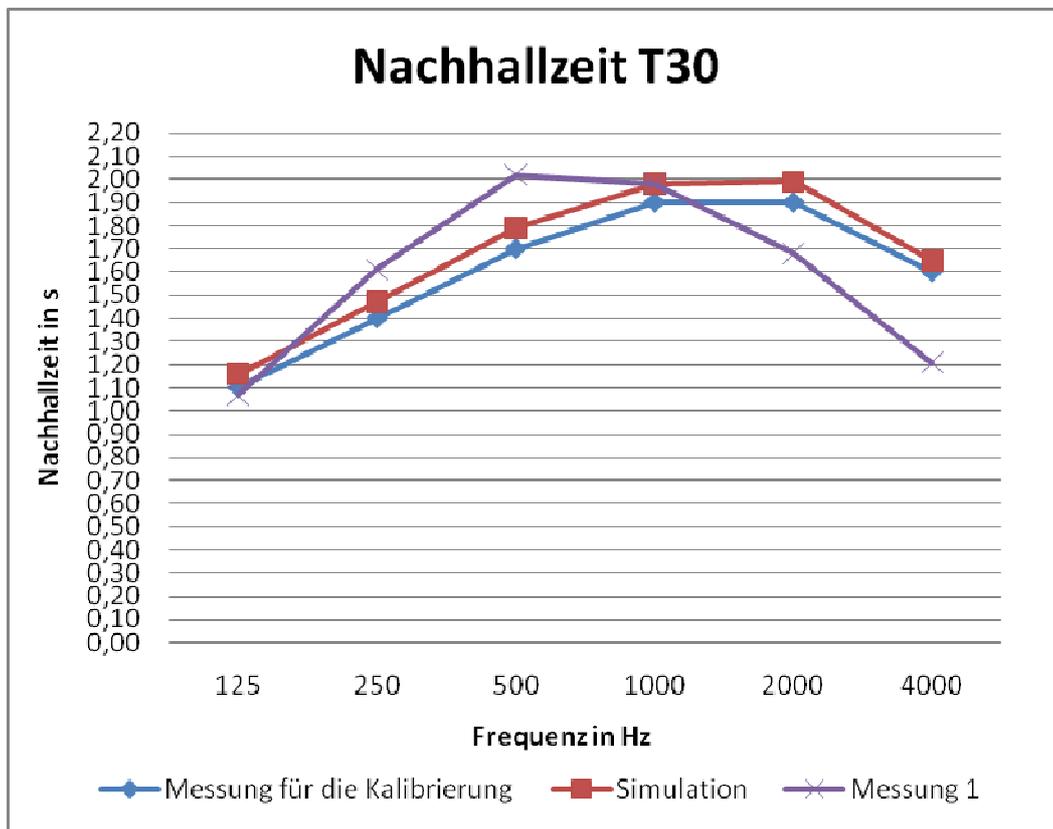


Abb. 5.2: Vergleich Nachhallzeiten

5.2 Vergleich mit allen Absorbern bestückter Raum

Vergleich Klarheitsmaß

Nachdem nun der ganze Raum nicht nur virtuell sondern auch real mit schallabsorbierendem Material akustisch optimiert wurde, sollten sich die Parameter Klarheitsmaß und Nachhallzeit enorm verbessert haben.

Vergleicht man die untenstehenden Klarheitsmaßwerte mit denen aus Punkt 5.1, so sieht man einen generellen Anstieg um ca. 25 dB. Wie wir aus Kapitel 2 wissen, ist alles über 0 dB als „sehr gut (hohe Durchsichtigkeit bei Musik)“ einzustufen.

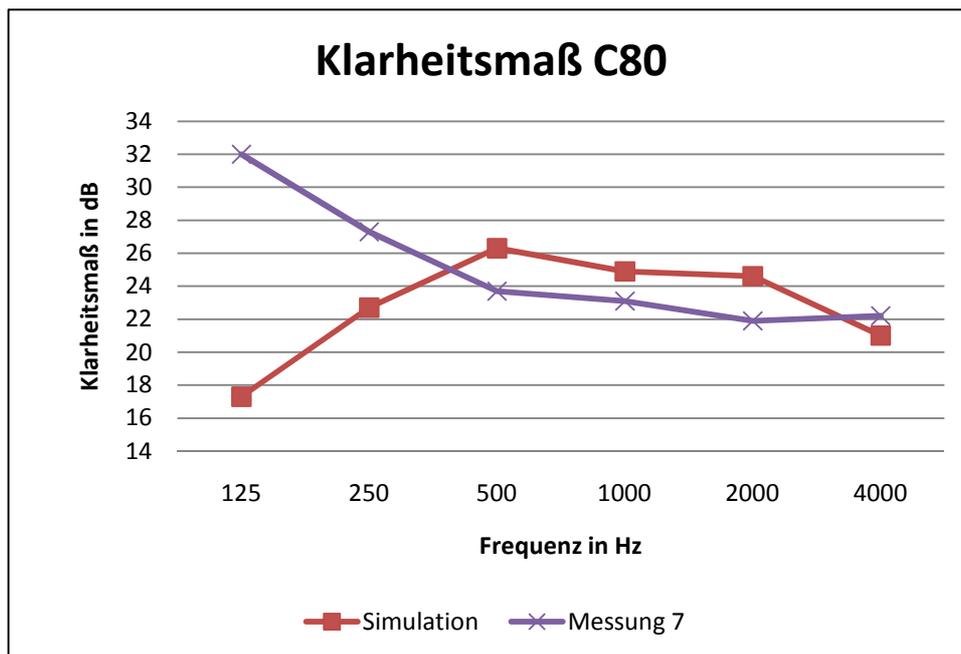


Abb. 5.3: Vergleich Klarheitsmaß mit Absorbern bestückter Raum

Tab. 5.3: Vergleich Klarheitsmaß mit Absorbern bestückter Raum

Hz	Simulation mit Absorbern bestückter Raum [dB]	Messung 7 [dB]
125	32.0	17.3
250	27.3	22.7
500	23.7	26.3
1000	23.1	24.9
2000	21.9	24.6
4000	22.2	21.0

Vergleich Nachhallzeit

Man erkennt deutlich die niedrigeren Nachhallzeiten über dem gesamten Frequenzband. Wie bei den untenstehenden Werten zu sehen ist, sind die Ergebnisse der letzten Messung wirklich sehr gut und ausgewogen. Man hat im Mittel eine Nachhallzeit von 0,22 Sekunden über den interessanten Frequenzbereich. In Abbildung 5.4 sind zusätzlich noch die obere und untere Grenze für die Nachhallzeit laut ITU-R BS 1116-1[16] Standard eingetragen.

Tab. 5.4: Vergleich der Nachhallzeiten mit Absorbern bestückter Raum

f [Hz]	Simulation mit Absorbern bestückter Raum [s]	Messung 7 [s]
125	0.36	0.23
250	0.27	0.22
500	0.19	0.22
1000	0.21	0.21
2000	0.22	0.22
4000	0.24	0.22

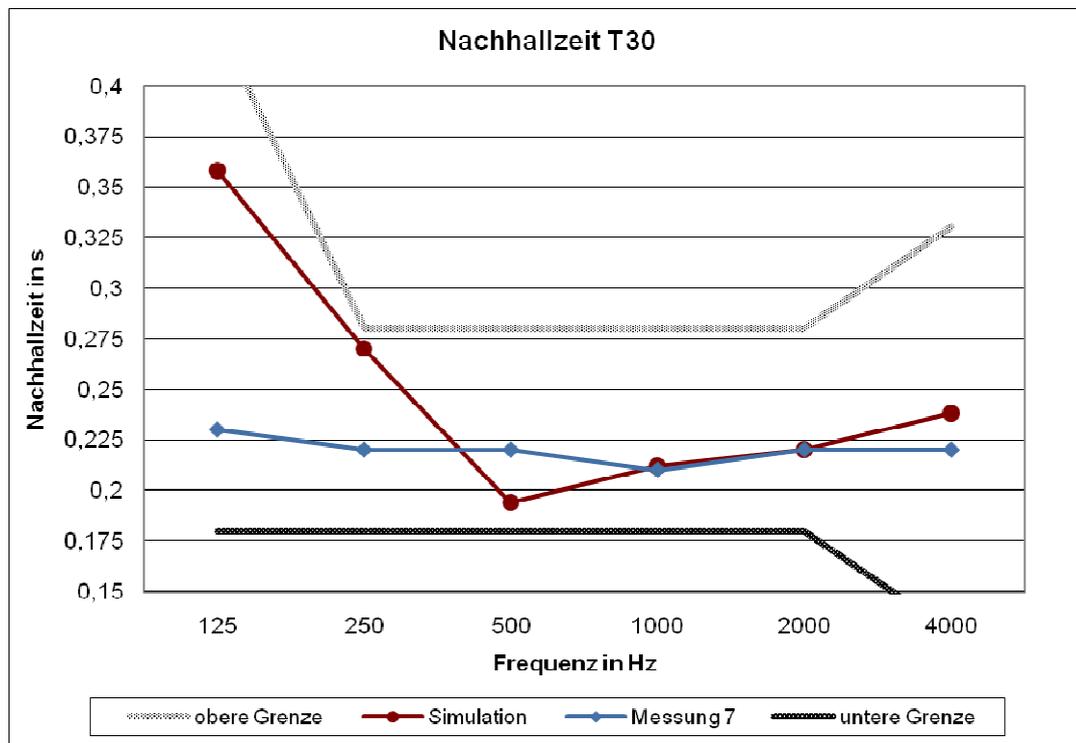


Abb. 5.4: Vergleich Nachhallzeiten

Der reale Raum (blaue Linie) verfügt über einen deutlich schöneren Nachhallzeitverlauf als die Simulation. Besonders bei tiefen Frequenzen zeigt sich ein stark verbessertes Ergebnis.

5.3 Optimierung der raumakustischen Parameter

Da das simulierte Raummodell trotz kleiner Abweichungen im tieffrequenten Bereich mit dem tatsächlich erbauten Raum gut übereinstimmte, gab es bei der Optimierung des Raumes gegenüber der Simulation nur einen einzigen Punkt, der verändert werden musste.

Im virtuellen Modell befanden sich zusätzlich zum akustischen Vorhang 3 Tieffrequenz-Absorber direkt vor der Fensterwand. Da jedoch nach der Messung 7 die Werte für die Nachhallzeit schon perfekt im vorgegebenen Bereich lagen, wurde auf die Aufstellung dieser mobilen Tieffrequenz-Absorber gänzlich verzichtet. Unter Punkt 3.2.2 sieht man bei der Abbildung 3.5 die geplanten Absorber (blau) und deren exakte Position.

6 Planung der Beschallungsanlage

Dieses Kapitel befasst sich mit der kompletten Planung und Installation der Beschallungs- und Abhöranlage des Hörprobenraumes. Beginnend mit den Anforderungen an das Equipment, die Auswahl der Lautsprecher und der notwendigen Peripherie, bis hin zur Verkabelung und Installation werden alle Punkte abgehandelt.

6.1 Anforderungen

Die Vorgabe seitens des Projektes war es erstens ein Mehrkanalwiedergabesystem im Format 5.1 zu planen und zu installieren und zweitens einen guten stereophonen Kopfhörer samt Verstärkereinheit in das System zu integrieren. Als technische Anforderungen an die Beschallungsanlage sollten die laut ITU-R BS 1116-1 [16] Standard geforderten Grenzwerte für die dort genannten elektroakustischen Parameter eingehalten werden. Da heutzutage fast jeder qualitativ hochwertige Abhörmonitor diese Kriterien erfüllt, konnte man bei der Auswahl der Komponenten flexibel sein.

Einzig die Aufstellung der Nahfeldmonitore laut Vorgabe könnte ein wenig Probleme bereiten, da die geometrischen Abmessungen des Raumes an der unteren Grenze für die Minimalanforderung eines Mehrkanalwiedergaberaumes liegen.

6.2 Lautsprecher

Da wie im oberen Absatz bereits beschrieben, beinahe jeder moderne qualitativ hochwertige Nahfeldmonitor die technischen Kriterien laut ITU-R BS 1116-1[16] Standard erfüllt, erfolgte die Auswahl der Lautsprecher anhand von Erfahrungswerten, Testberichten, Expertenmeinungen und zu guter Letzt anhand des zur Verfügung stehenden Budgets.

Die Wahl für die 5 Satellitenlautsprecher fiel auf das Modell „Klein+Hummel O300“ (www.klein-hummel.com).



Abb. 6.1: Beispielfoto eines Klein+Hummel O300 Nahfeldmonitors

Mit seiner extrem verzerrungsarmen Wiedergabe und mit dem ausgesprochen neutralen Klangbild von 40 Hz bis 20 kHz ist dieser Monitor qualitativ sowie preislich in der Oberklasse anzusiedeln.

Der zu diesem Surround Setup empfohlene Subwoofer „Klein+Hummel O870“ mit integriertem Bassmanagement System ist für eine spätere Erweiterung geplant.



Abb. 6.2: Beispielfoto eines Klein+Hummel O870 Subwoofers



Abb. 6.4: Originalfotos von der Positionierung der Abhöranlage

6.4 Stereophoner Kopfhörer und Verstärkereinheit

Als zusätzliche Option zur mehrkanaligen Abhörmonitoranlage entschloss man sich dazu, einen stereophonen Elektrostatenkopfhörer mit passender Treibereinheit zu installieren. Nach einiger Recherche und nach Einholen von verschiedenen Expertenmeinungen entschied man sich für das Modell „STAX SR4040II“. Zu dieser Einheit gehören der „STAX SR4040 Kopfhörer“ und das „STAX SRM006TII Verstärkermodul“.



Abb. 6.5: Beispielfoto der STAX SR4040II Stereo-Kopfhörer-Einheit

6.5 Kabel/Verlegung

Ein wesentlicher und deshalb nicht zu vernachlässigbarer Punkt stand noch aus, und zwar die Verkabelung des ganzen Systems. Da bei diesem Bauprojekt nur qualitativ hochwertige Produkte und Materialien eingesetzt wurden, sollte auch die Verkabelung diesem Standard entsprechen.

Die Verlegung der Kabel wurde durch die im Boden versenkten Kabelschächte und Steckfelder realisiert. Strom- und Signalkabel versuchte man getrennt voneinander zu führen und die Möglichkeit, die Tische und die Abhöranlage bei Bedarf verschieben zu können, wollte man sich auch noch offen halten.

Prinzipiell schaut die Verkabelung so aus, dass die im PC verbaute RME Hammerfall DSP 9632 PCI Karte mit 2 optischen Leitungen im ADAT Format an ein Motu 828 mkII Interface angeschlossen ist. Somit gibt es die Möglichkeit 8 Kanäle Audio vom PC zum Interface zu schicken und gleichzeitig 8 Kanäle Audio vom Interface zum PC zu senden. Zur Synchronisation der beiden Geräte wurde zusätzlich eine Wordclock- Leitung verlegt.

Die analoge Verbindung des Motu 828 mkII Interfaces mit dem SPL SMC 2489 Surround Monitor Controller ermöglicht nun das getrennte Abhören der einzelnen Surround Kanäle. Entweder kann man sich die Signale über die mit symmetrischen XLR Kabeln verbundenen Klein+Hummel Nahfeldmonitoren anhören oder man benutzt das STAX Kopfhörersetup.

Mittels eines VGA Splitters erhält der Touchscreen am Probandentische das gleiche Bildschirmsignal wie der Monitor am Supervisorortisch. Der zweite Ausgang der Grafikkarte, der DVI Ausgang, wird zusätzlich zum Supervisorortisch geführt, wodurch sich für den Übungsleiter die Möglichkeit ergibt zwischen diesen beiden Signalen hin und her zu schalten. Durch die seriellen RS 232 Leitungen werden Steuersignale vom Touchscreen des Probandentisches und vom Keyboard und der Mouse am Supervisorortisch an den PC übertragen werden.

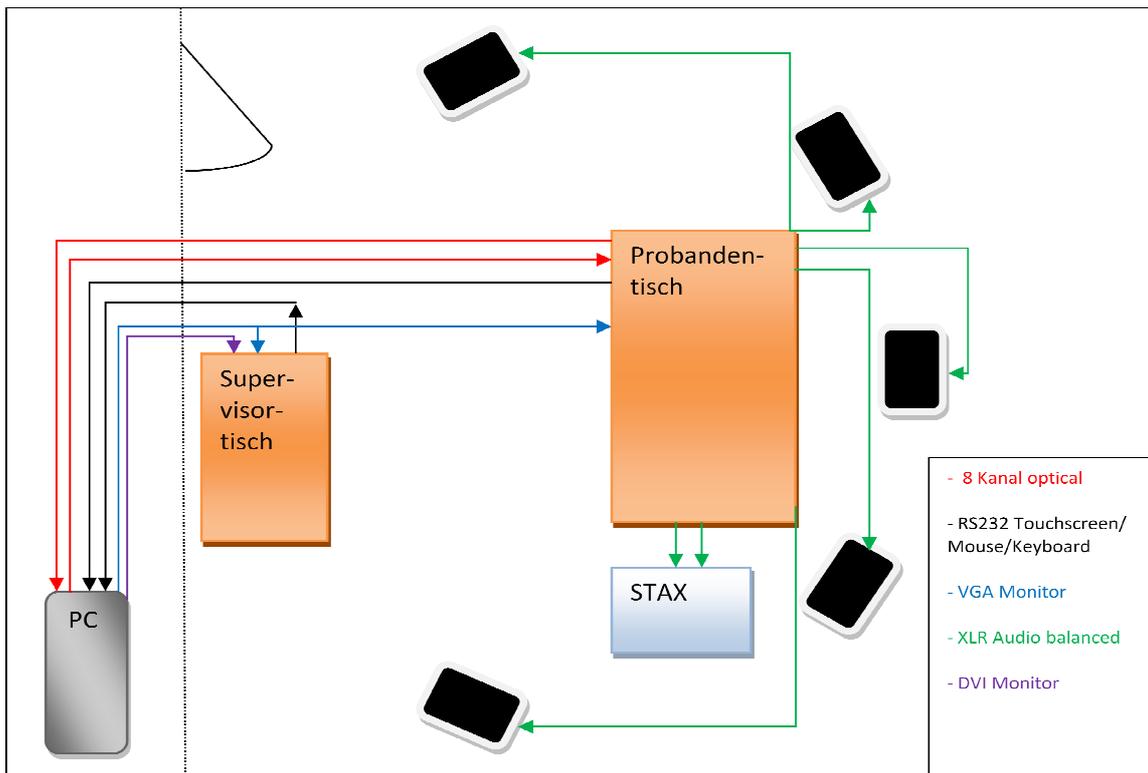


Abb. 6.6: Signalflussplan Hörprobenraum

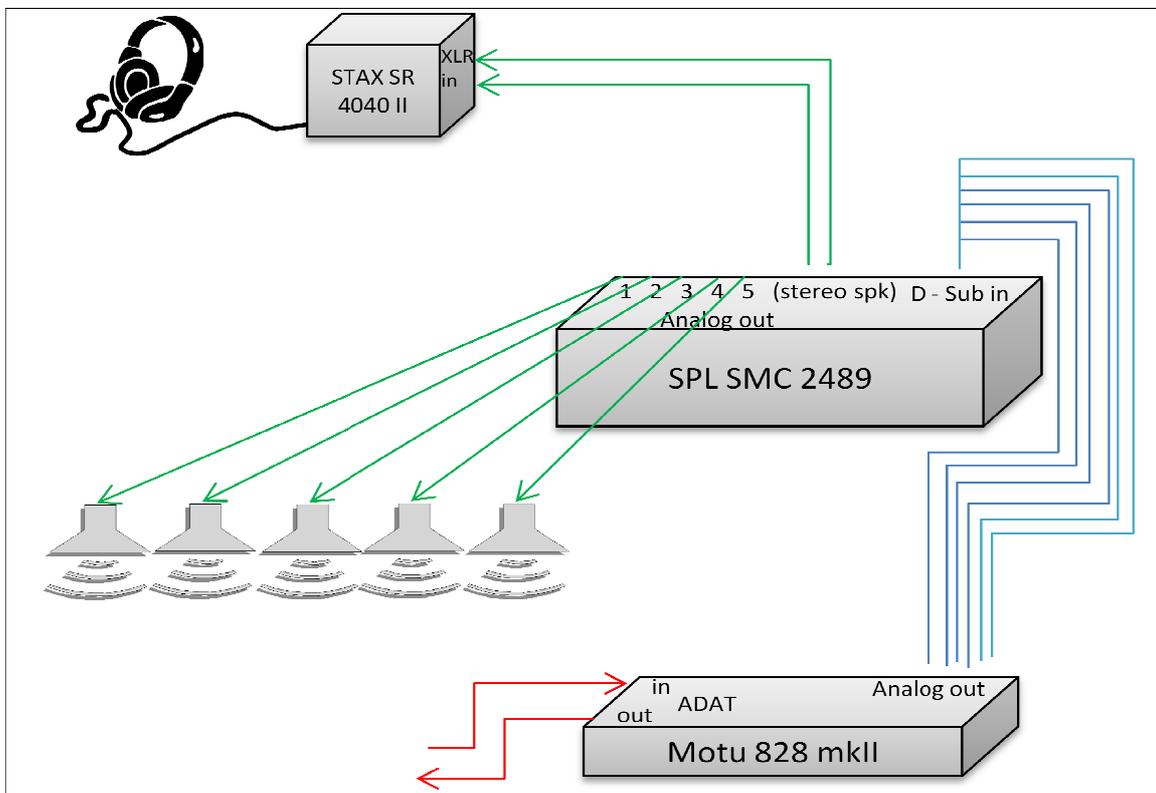


Abb. 6.7: Signalflussplan Probandentisch

7 Einmessen der Beschallungsanlage

Nachdem die AbhÖranlage nun ordnungsgemäß aufgestellt und verkabelt war, fehlte zum Schluss nur noch ein einziger Punkt und zwar das Einmessen und Kalibrieren der Beschallungsanlage. Laut ITU [16] Standard sollte bei einem Mehrkanalwiedergabesystem eine Grundgeräuschpegelmessung durchgeführt, die Betriebsschallpegelkurve pro Kanal gemessen und der Referenz- Abhörschallpegel eingestellt werden.

7.1 Messaufbau

Um während der Messungen möglichst flexibel zu bleiben und zur gegenseitigen Kontrolle der Messergebnisse, wurden gleich zwei Systeme aufgebaut und kalibriert.

Das erste Messsystem bestand aus der Software WinMLS 2004 (welche am Haupt- PC installiert wurde), der bereits eingebauten RME Hammerfall DSP 9632 PCI Karte und einem AVM Messmikrofon mit Kugelcharakteristik des Types MI 17SW. Dabei wurden die Messsignale direkt aus der Software, über den optischen Ausgang der RME Karte, auf das Motu Interface geschickt und von dort über den SPL Surround Monitor Controller an die einzelnen Lautsprecher verteilt. Mit dem an der RME Soundkarte angeschlossenen Messmikrofon konnten die Lautsprecherantworten gemessen werden.

Das zweite System setzte sich aus dem Larson&Davis 2900 A Schallpegelgenerator/Analysator und dem dazu passenden Brüel&Kjaer Messmikrofon mit Kugelcharakteristik zusammen. Bei dieser Messanordnung wurden die generierten Signale direkt in den SPL Surround Monitor Controller geschickt und von dort wieder auf die einzelnen Lautsprecher verteilt. Die gemessenen Daten waren zuerst am Analysator selbst gespeichert und konnten anschließend auf einen Laptop mit der darauf installierten „DNA“ Software heruntergeladen werden.

Bei beiden Messanordnungen stand das Messmikrofon im Sweet Spot des Probandentisches auf einer Höhe von 1,2 m (siehe auch Abb.6.3).

7.2 Kalibrierung

Um zu gewährleisten, dass der gemessene Schalldruck auch wirklich diesem entspricht, mussten beide Messmikrofone für das Einstellen des Referenz- Abhörpegels (siehe Punkt 7.5) und für die Messung des Grundgeräuschpegels kalibriert werden.

Dies wurde beim Larson&Davis 2900 A durch Aufsetzen eines geeichten Schallpegelkalibrators (93,8dB @ 1kHz) auf das Messmikrofon und anschließendem Abgleich am Gerät durchgeführt.

Beim System mit der WinMLS 2004 Software wurde ebenfalls der geeichte Schallpegelkalibrator auf das Messmikrofon aufgesetzt, jedoch fand der Abgleich direkt in der Software statt.

7.3 Grundgeräuschpegelmessung

Als Vorgabe für einen Mehrkanalwiedergaberaum gemäß ITU-R BS 1116-1 [16] Standard sollte der Grundgeräuschpegel die NR 15 (Noise Rating Curve) nicht überschreiten. Gemessen wurde der lineare Oktavband Schalldruckpegel im Frequenzbereich von 63 Hz bis 8 kHz.

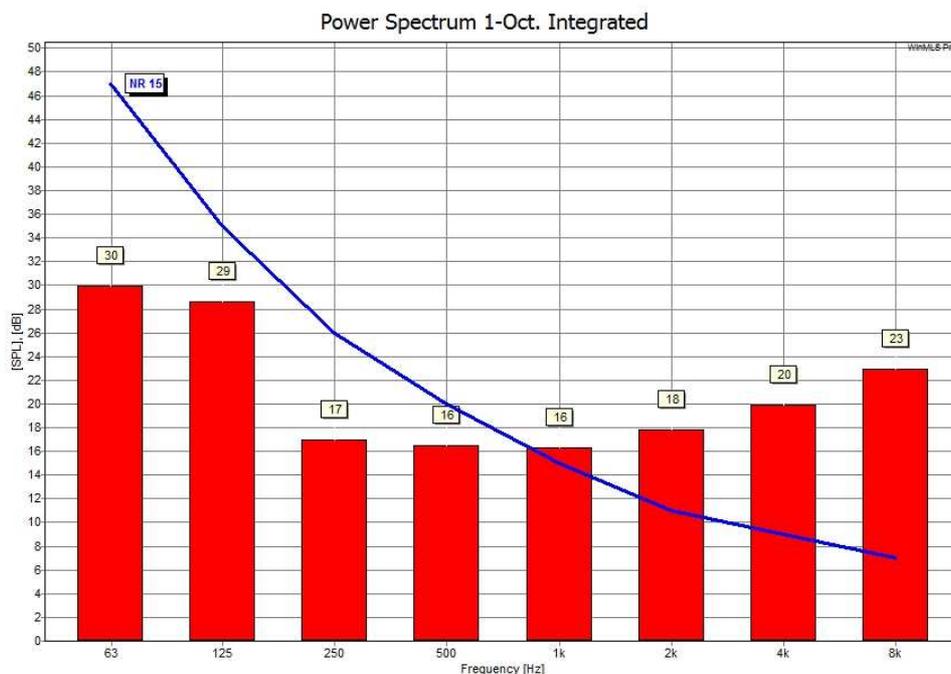


Abb. 7.1: Oktavband – Grundgeräuschpegel(linear) im Hörprobenraum

Man kann erkennen, dass die Vorgabe in den oberen Frequenzbändern nicht eingehalten werden konnte. Da im Hörprobenraum selber aber keine Störquellen ausfindig gemacht werden konnten, sind die Fenster die letzte mögliche Ursache dafür. Da diese noch nicht gegen die geplanten Schallschutzfenster ausgetauscht wurden, könnte man wahrscheinlich mit dieser Maßnahme die hochfrequenten Störgeräusche von Außerhalb weiter unterdrücken und damit die Vorgabe erfüllen. In Abb. 7.2 sieht man den A-bewerteten Gesamtgrundgeräuschpegel.

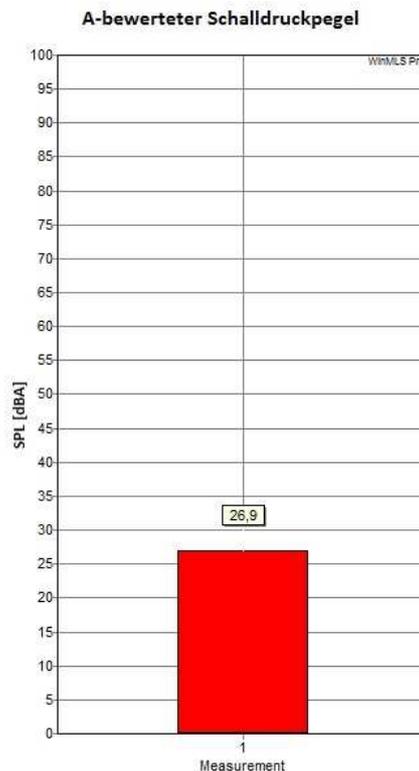


Abb. 7.2: Grundgeräuschpegel A- bewertet

7.4 Raumantwortkurve/Betriebsschallpegelkurve

Sie stellt ein wichtiges Kriterium der Wechselwirkung Raum- Lautsprecher dar und ist ein Maß für die Güte der Hörbedingungen. Gemessen wird der Frequenzgang des Schalldruckpegels am Bezugs- Hörerpunkt. Das Messsignal ist terzgefiltertes Rosa Rauschen. Die Toleranzen sollten für jeden einzelnen Lautsprecher getrennt eingehalten werden (siehe auch Punkt 2.4.3.3). Insbesondere für die Frontlautsprecher ist eine hohe Übereinstimmung der Betriebsschallpegelkurven von Bedeutung. [10]

In den folgenden Abbildungen sehen Sie die Betriebsschallpegelkurven der einzelnen Kanäle mit den zusätzlich eingezeichneten Toleranzgrenzen im Bereich von 50 Hz bis 16 kHz (schwarz) und dem SPL Mittelwert (rot) über diesen Frequenzbereich. (siehe auch Punkt 2.4.3.3)

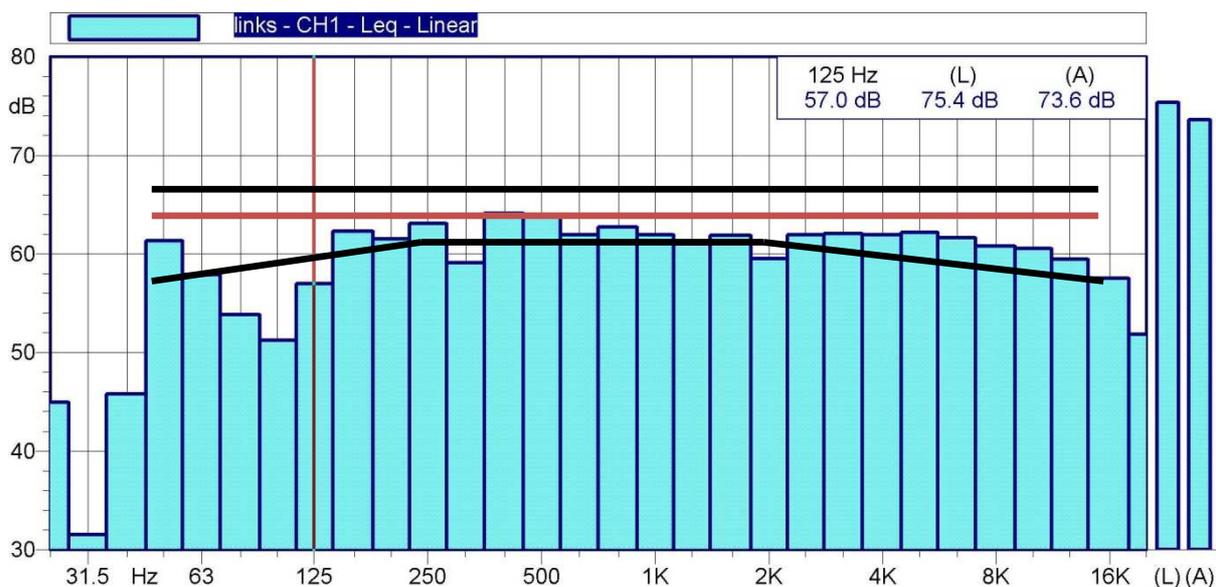


Abb. 7.3: Betriebsschallpegelkurve linker Monitor

Wie man bereits aus Abb. 7.3 sieht, sind die ± 2 dB Grenzen im Bereich von 250 Hz bis 2 kHz nur sehr schwer einzuhalten. Der starke Einbruch bei 100 Hz lässt auf eine Interferenz oder eine ungünstige Reflexion (z.B. vom Probandentisch) rund um diesen Frequenzbereich schließen. Ursache dafür könnte sein, dass der Lautsprecher genau dort in einer Mode des Raumes positioniert ist. Auch bei 315 Hz und bei 2 kHz liegt der der Terzbandpegel leicht unter der Grenze.

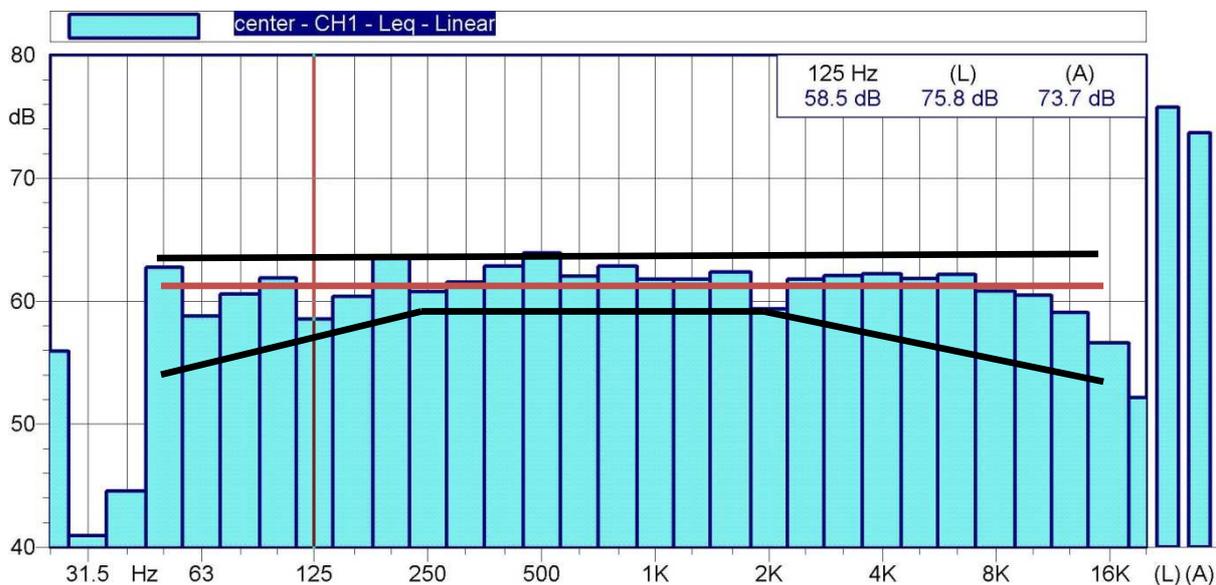


Abb. 7.4: Betriebsschallpegelkurve Center - Monitor

Beim Center- Monitorlautsprecher liegen alle Werte innerhalb der vorgegeben Toleranzgrenzen. Bei 2 kHz schafft man es gerade noch über der unteren Grenze zu bleiben.

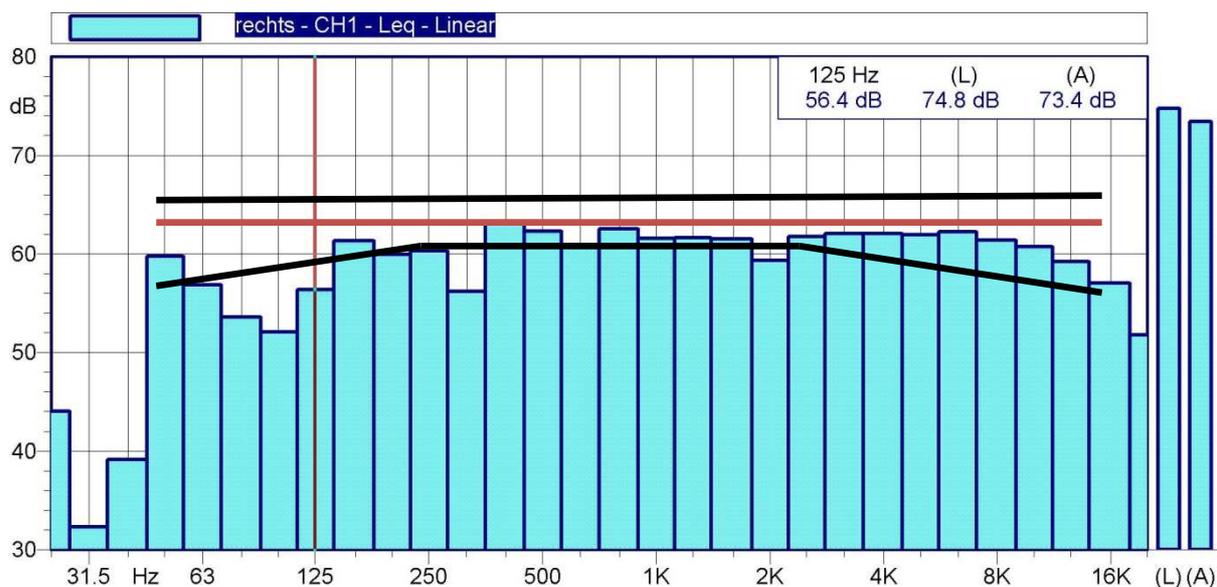


Abb. 7.5: Betriebsschallpegelkurve rechter Monitor

Auch beim rechten Haupt- Monitor erkennt man die 3 Einbrüche bei 100 Hz, 315 Hz und 2 kHz. Da diese doch sichtbar unter der Vorgabe liegen, sollte über eine Veränderung der Aufstellungsposition noch einmal nachgedacht werde.

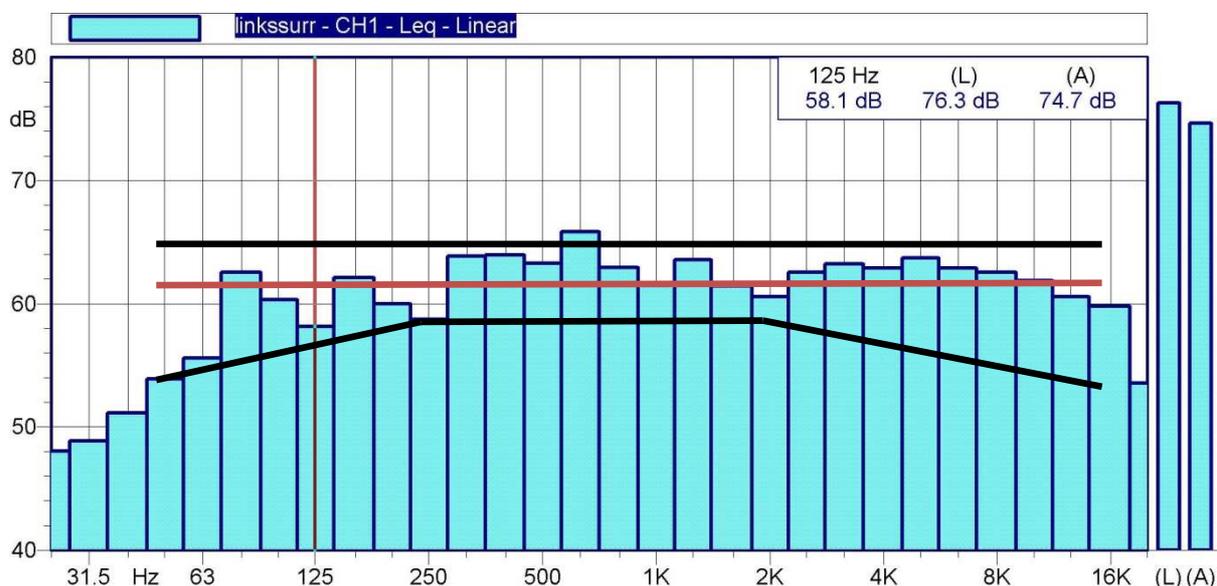


Abb. 7.6: Betriebsschallpegelkurve linker Surround – Monitor

Dafür, dass die Surround- Monitore doch sehr nahe an der Wand positioniert werden mussten, bekommt man durchaus gute Raumantwortkurven. Durch die Vergrößerung des Toleranzbereiches auf ± 3 dB (250 Hz bis 2 kHz) fallen beinahe alle Terzbänder innerhalb des Grenzbereiches.

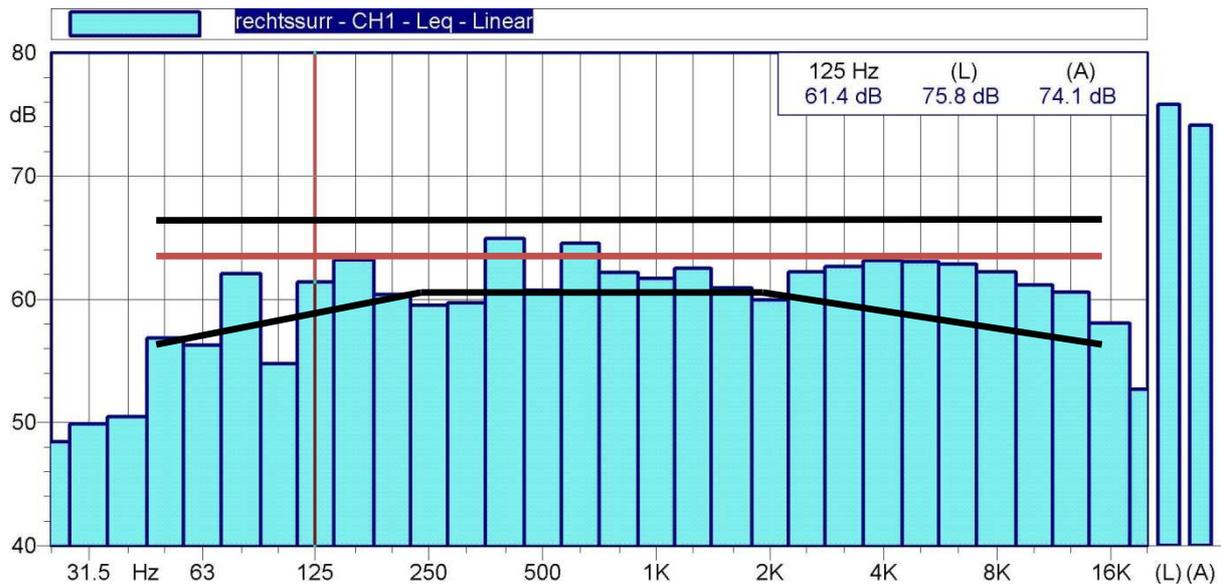


Abb. 7.7: Betriebsschallpegelkurve rechter Surround - Monitor

Beim rechten Surround- Monitor (siehe untere Grafik) gibt es deutlichere Spitzen und Einbrüche die es schwierig machen die geforderten Grenzen einzuhalten.

7.5 Referenz - Abhörschallpegel

Er charakterisiert die Empfindlichkeit eines Wiedergabekanals. Die Einstellung erfolgt mit bandbegrenztem Rosa Rauschen bei einem Digitalpegel von - 18 dBFS/RMS [11]. Die Verstärkungen der Wiedergabekanäle sind einzeln so einzustellen, dass am Bezugs-Hörerpunkt ein A- bewerteter Schalldruckpegel (RMS) von

$$L_{LIST\ ref} = 85 - 10 \log(n) \text{ dB (A)}$$

erreicht wird, wobei n die Zahl der Wiedergabekanäle darstellt.

Für eine 3/2-Anordnung sind pro Kanal somit 78 dB(A); bei 2/0 =Zweikanal-Stereo = 82 dB(A) erforderlich.

Die Pegeldifferenz zwischen zwei beliebigen Kanälen sollte 0,5 dB nicht übersteigen (ITU empfiehlt $\pm 0,25$ dB); insbesondere für die Frontlautsprecher ist eine hohe Übereinstimmung von Bedeutung.

Um eine gewisse Reproduzierbarkeit für verschiedene Anwendungsbeispiele gewährleisten zu können, musste für diesen Abgleich die gesamte Wiedergabekette (PC – Soundkarte – Interface – Monitorcontroller) in Betracht gezogen werden und somit kam nur das Messsystem mit der WinMLS Software in Frage.

Mit den folgenden Einstellungen erreichte man die unten gezeigten Messergebnisse:

- WinMLS output auf -18 dBFS/RMS
- RME Hammerfall Mixer auf 0 dB
- Motu Interface Mixer auf 0 dB
- SPL Monitorcontroller auf 70 %

Wie man bei den nachfolgenden Plots erkennen kann, ist der Abgleich der Frontallautsprecher sowie der Surround-Lautsprecher sehr gut gelungen. Mit einer maximalen Pegelabweichung von 0,25 dB liegt man innerhalb der Vorgaben laut ITU.

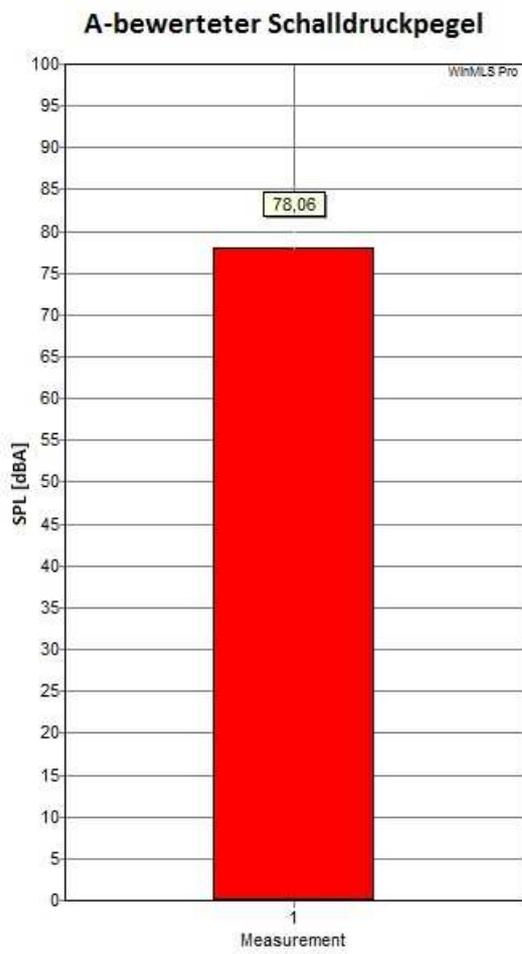


Abb. 7.8: Abhörschallpegel Links

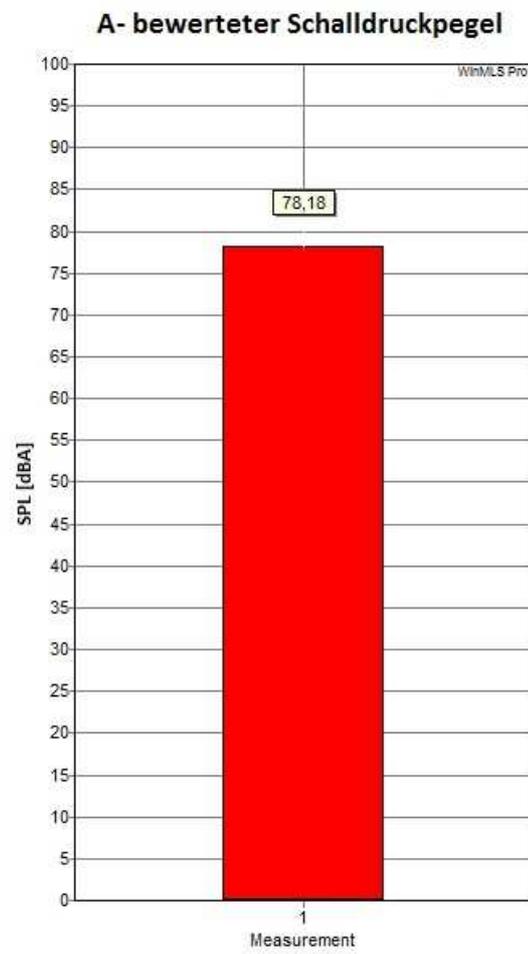


Abb. 7.9: Abhörschallpegel Center

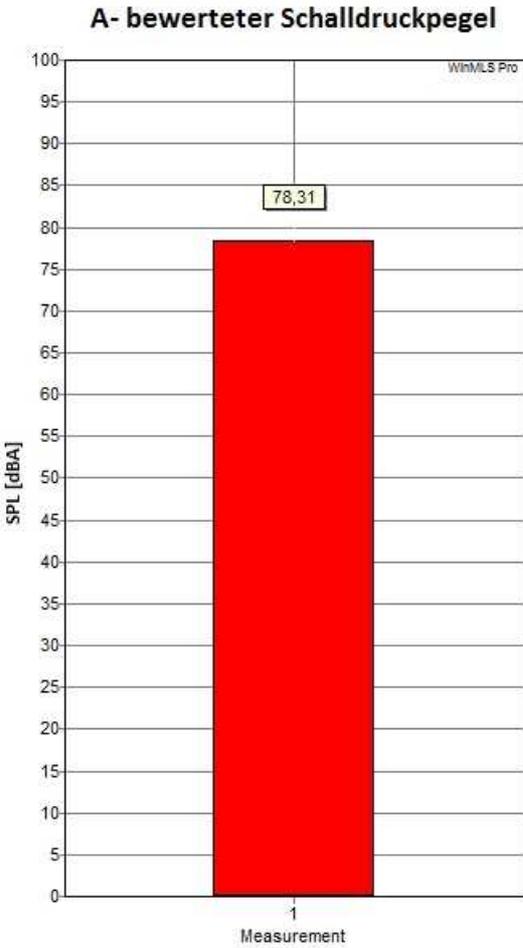


Abb. 7.10: Abhörschallpegel Rechts

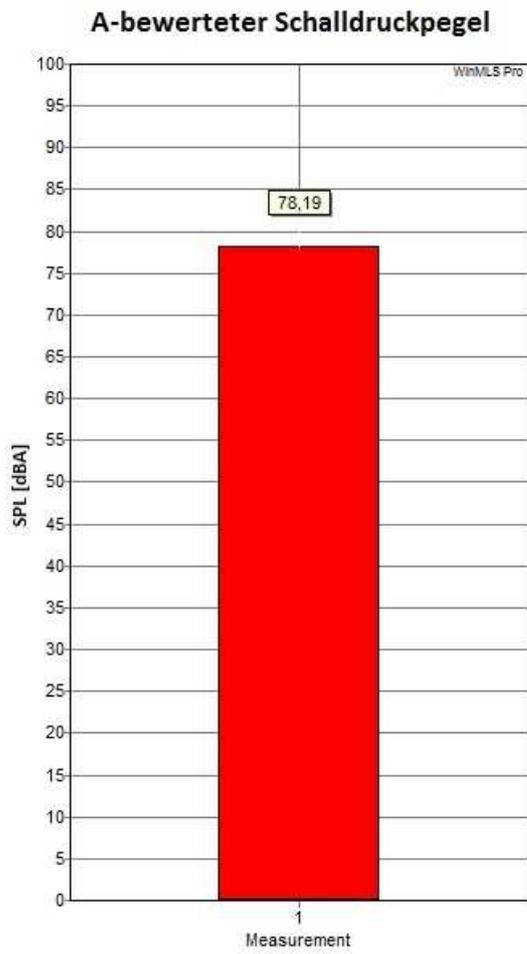


Abb. 7.11: Abhörschallpegel Links- Surround

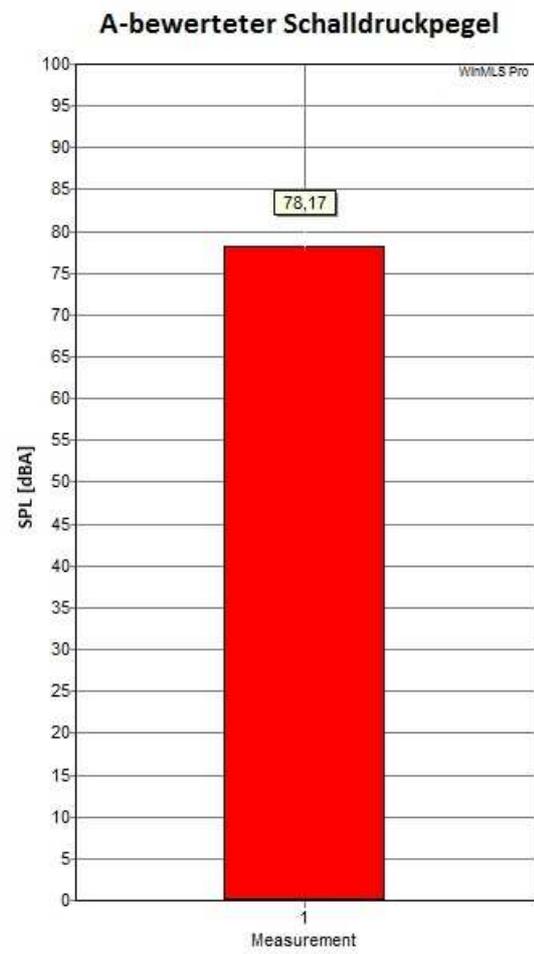


Abb. 7.12: Abhörschallpegel Rechts- Surround

8 Zusammenfassung

Der Wunsch nach einem eigenen standardisierten Hörprobenraum, in dem reproduzierbare Hörtest zur Qualitätsbeurteilung von Audiosignalen durchgeführt werden können, veranlasste die Arbeitsgemeinschaft AAP (Advanced Audio Processing) zur Planung und Bau eines solchen im Untergeschoss des JOANNEUM RESEARCH, Schießstattgasse 14b/I, 8010 Graz.

Der Inhalt dieser Arbeit handelt eher vom praktischen Teil dieses Projektes, genauer gesagt von der Vermessung der raumakustischen Parameter während des Baus bis hin zur Ausstattung und Installation des Mehrkanal- Beschallungssystems.

Um jedoch einen Überblick über die zur Konstruktion wichtigen Parameter und Standards zu erlangen, stand zuerst eine ausführliche Literaturrecherche in diesem Bereich auf dem Programm. Nachdem unter Kapitel 2 sowohl eine Auflistung der zum Verständnis benötigten raumakustischen- sowie elektroakustischen Parameter, als auch ein Vergleich der aktuell existierenden Standards zur Konstruktion von Hörprobenräumen und zusätzlich ein Überblick über bereits existierende standardisierte Räume durchgeführt wurde, werden anschließend die Ergebnisse der raumakustischen Simulation mit dem Programm CATT Acoustic® präsentiert. Als passender Standard für dieses Projekt wurde der von der ITU (International Telecommunication Union) vorgeschlagene ITU-R BS 1116-1 [16] gewählt.

Das vierte Kapitel dokumentiert nach und nach die Veränderung der raumakustischen Parameter während der einzelnen Bauschritte. Die Vermessung wurde mittels der handelsüblichen Software WinMLS durchgeführt und für eine spätere Reproduktion der Messungen gibt es genaue Aufstellungspläne sowohl für die Quell-, als auch für die Zielpositionen. Der anschließende Vergleich zwischen Simulation und Messung ist sehr interessant. Er wurde einmal für den leeren- und einmal für den mit allen Absorbern bestückten Raum durchgeführt.

In den letzten beiden Teilen dieser Arbeit geht es um die Mehrkanalbeschallungsanlage. Unter Einhaltung der laut ITU Standard geforderten elektroakustischen Kriterien wurden passende qualitativ hochwertige Nahfeldmonitore ausgesucht und richtig aufgestellt. Nachdem das ganze System, inklusive sehr guter stereophoner Kopfhörereinheit, richtig verkabelt war, wurden die 5 Lautsprecher schlussendlich noch mittels zweier Messsysteme (WinMLS und Larson&Davis Generator/Analysator) eingemessen. Die Vorgaben für dieses Procedere sind ebenfalls in der Empfehlung ITU-R BS 1116-1 [16] enthalten.

9 Literaturverzeichnis

- [1] W. AHNERT, F. STEFFEN: “Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis“, Hirzel, Leipzig 1993.
- [2] ARATO-BORSI Eva: *New Reference listening Room for Two-Channel and Multichannel Stereophonic*. Audio Engineering Society 104th Convention, Amsterdam, May 1998
- [3] BAIRD, M.D.M.: *A Wideband Absorber for Television Studios*. BBC Research Report No 1994/12
- [4] www.baunetzwissen.de; Stand Februar 2010
- [5] BECH Søren, ZACHAROV Nick: *Perceptual Audio Evaluation*. Wiley, 2006
- [6] BORENIUS Juhani, KORHONEN Seppo: *New Aspects on Listening Room Design*. Audio Engineering Society 77th Convention, Hamburg, March 1985
- [7] M. DICKREITER: “Handbuch der Tonstudioteknik“, Sauer Verlag KG, München 1997.
- [8] EBU. *Technical Document Tech 3276: Listening Conditions for the Assessment of Sound Programme Material: Monophonic and Two-Channel Sound*. European Broadcasting Union, May 1998
- [9] EBU. *Technical Document Tech 3276: Listening Conditions for the Assessment of Sound Programme Material: Multi-Channel Sound*. European Broadcasting Union, February 1999
- [10] EBU-Empfehlung: Listening conditions for the assessment of sound programme material. EBU Technical Recommendation R 22 – 1999 (Siehe EBU document Tech 3276 - 1998 (second edition): Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic). EBU Doc. Tech 3276-1999: Supplement 1: Multichannel Sound.
- [11] EBU-Empfehlung: Alignment Level in digital Audio Production Equipment and in digital Audio Recorders. EBU Technical Recommendation R 68 - 1992.
- [12] GRABER G, WESELAK W: *Raumakustik VO, Version 3.0*. TU Graz, Institut für Breitbandkommunikation, SS 2004
- [13] GRABER G, WESELAK W: *Elektroakustik VO, Version 8.2* TU Graz, Institut für Breitbandkommunikation, WS 2006/07
- [14] GÖRNE Thomas: *Tontechnik*. 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig, 2006

- [15] Anselm GOERTZ: Lautsprecher. In: Stefan Weinzierl (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, Berlin 2008
- [16] ITU-R. Recommendation BS 1116-1, Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound Systems. International Telecommunication Union Radiocommunication Assembly, 1997.
- [17] ISHII Shinichiro, MIZUTANI Toshiyuki: *A New Type of Listening Room and its Characteristics – A Proposal for a Standard Listening Room*. Audio Engineering Society 72nd Convention, Anaheim, October 1982 Engineering Society 84th Convention, Paris, March 1988
- [18] JÄRVINEN A., SAVIOJA L., MÖLLER H., IKONEN V., RUUSUVUOR A.: *Design of a Reference Listening Room – A Case Study*. Audio Engineering Society 103rd Convention, New York, September 1997
- [19] KOIVUNIEMI Kalle: *Oral Information*
- [20] NAQVI Amber, RUMSEY Francis: *The Active Listening Room Simulator: Part 1*. Audio Engineering Society 110th Convention, Amsterdam, May 2001
- [21] NAQVI Amber, RUMSEY Francis: *The Active Listening Room Simulator: Part 2*. Audio Engineering Society 112th Convention, Munich, May 2002
- [22] NAQVI Amber, RUMSEY Francis: *The Active Listening Room Simulator: Part 3*. Audio Engineering Society 112th Convention, Munich, May 2002
- [23] SEREINIG Andrea: Specification of a Standardized Listening Room for an Expert Listening Panel. Audio Engineering Project, TU Graz, JOANNEUM Research, Graz 2009
- [24] STEINKE Gerhard: *Minimum Requirements for Reference Listening Rooms*. Audio
- [25] STEINKE Gerhard: *Minimum Requirements for Reference Listening Rooms*. Audio Engineering Society 84th Convention, Paris, March 1988
- [26] www.thielaudio.com; Stand Juni 2010
- [27] WALKER R.: *A New Approach to the Design of Control Room Acoustics for Stereophony*. Audio Engineering Society 94th Convention, Berlin, March 1993
- [28] WALKER R.: *Controlled Image Design: The management of stereophonic image quality*. BBC Research Report No. 1995/4
- [29] WALKER Robert: *A Controlled-reflection Listening Room for Multichannel Sound*. Audio Engineering Society 104th Convention, Amsterdam, May 1998
- [30] ZOLLNER, M. und ZWICKER E.: *Elektroakustik*. Springer 1993, 3.Auflag