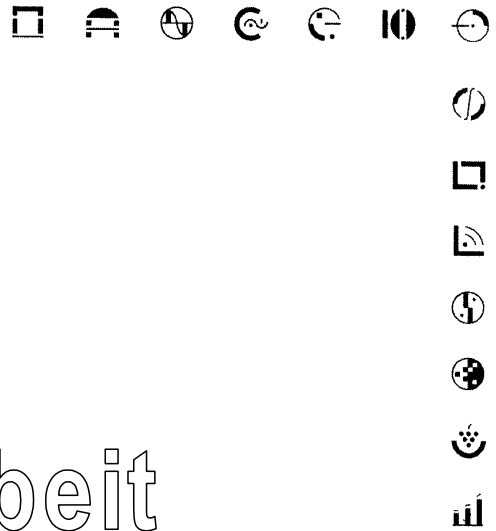




Fachhochschule Wiesbaden
University of Applied Sciences



Diplomarbeit

GESAMTSCHALLPEGEL IN RÄUMEN

MIT MEHREREN

ELEKTROAKUSTISCHEN QUELLEN

vorgelegt von : Jörg Orendi

am : 1.Juni 2005

Referent : Prof. Dr.-Ing. Christof Ricken

Korreferent : Dipl. Phys. Ing. Volker Löwer



Fachbereich 03
Elektrotechnik
Studiengang
Fernsehtechnik und
elektronische Medien

Ich versichere hiermit, diese Diplomarbeit selbständig angefertigt zu haben sowie, dass alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel in der Arbeit angegeben sind.

Der Einsicht in diese Diplomarbeit und der Ausleihe eines Exemplares stimme ich zu / stimme ich nicht zu*.

(Ort / Datum)

(Unterschrift Studentin / Student)

Nur von der Betreuerin / von dem Betreuer auszufüllen :

Gegen die Einsicht in diese Diplomarbeit und gegen die Ausleihe eines Exemplars wird / kein* Einspruch erhoben.

(Unterschrift Betreuerin / Betreuer)

Begründung (bei Einspruch) :

* : Nichtzutreffendes bitte streichen.

INHALT

Inhalt	III
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Teil mit Grundlagen.....	3
2.1 Der Energieerhaltungssatz.....	3
2.1.1 Akustischer Teil: Was passiert in der Luft?	4
2.1.2 Elektrotechnischer Teil: Was passiert vor der elektroakustischen Wandlung?	9
2.1.3 Grundsätzliches zu Pegeln	11
2.2 Drei Wege zur Berechnung von Gesamtschalldruckpegeln	12
2.2.1 Mathematische Pegelrechnung.....	13
2.2.2 Hopkins-Stryker-Gleichung	14
2.2.3 Simulations-Software Ulysses.....	16
3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung	20
3.1 Die Messumgebungen	21
3.2 Die Test- und Mess-Signale	25
3.3 Die Modellversuche.....	31
3.3.1 Erster Modellversuch	35
3.3.2 Zweiter Modellversuch	49
3.3.3 Dritter Modellversuch	59
3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Modellversuchen	62

4	Zusätzliche Ergebnisse aus dem Alltag von IFBcon.....	70
4.1	Sitzungssaal im Rathaus Offenbach	70
4.2	Gottlieb-Daimler-Stadion in Stuttgart.....	73
4.3	Hornbergtunnel im Schwarzwald.....	76
5	Zusammenfassung	79
5.1	Wichtige Faktoren bei der Berechnung und Messung von Gesamtschalldruckpegeln	79
5.2	Schlusswort.....	82
6	Anhang	83
6.1	Software zum Thema Berechnung, Messung und Simulation.....	83
6.2	Ulysses Systemvoraussetzungen	84
6.3	Nachhallzeit nach W. C. Sabine.....	84
6.4	Nachhallzeiten im Seminarraum 201 gemessen mit MLSSA	85
6.5	Von Ulysses berechnete Absorptionsfläche im Seminarraum 201	86
6.6	Eigenfrequenzen des Seminarraums	87
6.7	Analysen der Testsignale aus Cool Edit.....	88
6.8	Skizzen zu den Modellversuchen.....	89
6.9	Datenblätter JBL Control 29 AV	91
6.10	Impedanzkurven JBL Control 29 AV	96
6.11	Mathematische Pegeladdition mit Tabellen und Diagrammen	97
6.12	Bewertungsfiler für Schalldruckpegel	98
6.13	Die verwendete Ausrüstung	99
6.14	Berechnungen in den Modellversuchen	99
6.15	Daten-CD	102
7	Verzeichnisse	103
7.1	Quellen und Literatur.....	103
7.2	Abbildungen	105
7.3	Tabellen	108

1 EINLEITUNG

Die Berechnung von Gesamtschalldruckpegeln in Räumen mit mehreren elektroakustischen Quellen ist das Thema dieser Arbeit. Allein die beinahe unbegrenzten Möglichkeiten in der Architektur sowie die Vielfalt der Produkte auf dem Markt der Beschallungstechnik lassen sofort ahnen, dass die Planung in diesem Bereich nicht trivial ist. Für Festinstallationen in Versammlungsstätten beispielsweise gelten zudem gesetzliche Vorschriften, die während des Betriebs einer Beschallungsanlage unbedingt beachtet werden müssen. Nicht nur die Lärmimmission in der Nachbarschaft oder die ungesunde Wirkung zu hoher Lautstärken sind von Relevanz, sondern auch der Aspekt Sicherheit in Notfallsituationen. Das bedeutet: Bestimmte Schalldruckpegel müssen mit der Beschallungsanlage erreicht werden können, damit in der für den jeweiligen Ort oder Raum üblichen Versammlungs- oder Veranstaltungssituation genügend laute und verständliche Durchsagen gemacht werden können, um im schlimmsten Fall sicher zu evakuieren.

In der Planungsphase sollte also bereits beurteilt werden können, ob die gewählten Geräte den Anforderungen entsprechen oder gegen andere Komponenten ausgetauscht werden müssen.

Ein kurzes Beispiel aus der Praxis: Das Planungsbüro IFBcon hat nach der Installation der neuen Beschallungsanlage in einem Fußballstadion Messungen durchgeführt. Mit einem Präzisionsschallpegelmesser wurden folgende Werte aufgenommen:

1. Musik von einer CD: 105 dB Schalldruckpegel, A – bewertet, Modus: fast
2. Musik von einer CD: 108 dB Schalldruckpegel, A – bewertet, Modus: impulse

3. Rosa Rauschen: 101 dB Schalldruckpegel, A – bewertet, Modus: fast

Die Simulations-Software ULYSSES berechnete den maximalen Direktschalldruckpegel zu 109 dB im mittleren Frequenzbereich. Bei so unterschiedlichen Werten stellen sich die Fragen: Warum gibt es unterschiedliche Ergebnisse? Gibt es Fehler? Wo sind Fehler? Welche Einflüsse haben eine Rolle gespielt? Wie kann man denn vorher berechnen, was hinterher auch gemessen wird? Wie berechnet man Gesamtschallpegel? Wie und was wird gemessen?

Abgesehen davon, dass alle oben genannten Werte als laut empfunden werden, sollte beachtet werden, dass bereits eine Pegelerhöhung um 3 dB einer Verdopplung der Leistung entspricht. Bei einer großen Beschallungsanlage mit vielen tausend Watt elektrischer Anschlussleistung wird es schnell zu einer finanziellen Frage, eine Pegelerhöhung von ‚nur‘ 3 dB zu realisieren!

Genau und sichere Aussagen über erreichbare Werte einer geplanten Beschallungsanlage sowie die richtige Interpretation von Messergebnissen sind unumgänglich.

Diese Arbeit soll helfen, den Überblick im Umgang mit Messdaten und den Zusammenhängen bei der Berechnung von Gesamtschalldruckpegeln zu bewahren. Sie soll als Zusammenfassung der Faktoren dienen, die bei der Berechnung und Messung von Gesamtschalldruckpegeln wichtig sind. Im Laufe der Arbeit werden sowohl Modellversuche durchgeführt, als auch Ergebnisse aus dem Alltag des Planungsbüros IFBcon herangezogen.

2 THEORETISCHER TEIL MIT GRUNDLAGEN

2.1 DER ENERGIEERHALTUNGSSATZ

Lautsprecher gehören zur Gruppe der elektroakustischen Wandler. Sie sind bei der Wiedergabe eines Signals durch eine Beschallungsanlage direkt verantwortlich für das Entstehen des Schalldrucks in der Luft.

Durch das fundamental gültige Gesetz der Energieerhaltung kann die Überführung der dem Lautsprecher zugeführten elektrischen Energie in die abgestrahlte akustische Energie ausgedrückt werden. Wie bei jeder Energiewandlung, treten auch hier Energieverluste in Form von Wärme und Reibung auf:

$$E_{el} = E_{ak} + E_{Verlust} \quad (1)$$

Oder ausgedrückt in Leistungen und dem Wirkungsgrad der Wandlung:

$$P_{ak} = \eta \cdot P_{el} \quad (2)$$

Nach dem Prinzip der elektroakustischen Wandlung erklärt sich der direkte Zusammenhang zwischen Signalspannung und erzeugtem Schalldruck. Die Untersuchung der relevanten Punkte bei der Gesamtschallberechnung kann somit in zwei Blöcke unterteilt werden. Ein akustischer Teil: Was passiert in der Luft? Und ein elektrotechnischer Teil: Was passiert vor der elektroakustischen Wandlung?

2.1.1 AKUSTISCHER TEIL: WAS PASSIERT IN DER LUFT?

Der **Schallwechseldruck**, kurz Schalldruck, beschreibt die Änderung des aktuellen atmosphärischen Luftdrucks, der unter Normalbedingungen bei ca. 1013 hPa liegt. Die Veränderung im Luftdruck entsteht durch die Überlagerung mit den Schallwellen. Die für den Menschen hörbaren Luftdruckschwankungen liegen bei der Frequenz 1000 Hz zwischen 20 μ Pa und 200 Pa. Da der Schalldruck eine Wechselgröße ist, kann der Spitzenwert (engl.: peak), der Effektivwert (engl.: root mean square, rms) oder der Scheitel-Faktor (engl.: crest-factor) angegeben werden. Diese Begriffe sind von den elektrotechnischen Wechselgrößen her bekannt. Der Schalldruckpegel wird durch das Verhältnis von quadriertem Effektivschalldruck zum Quadrat des genormten Bezugsschalldrucks (20 μ Pa) gebildet:

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) dB = 20 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right) dB \quad (3)$$

Die **Schallschnelle** gibt an mit welcher Geschwindigkeit die Moleküle um ihre Ruhelage schwingen. Sind die Schwingungen von Schalldruck und Schallschnelle in Phase, breitet sich die Schallwelle im Medium aus, der Energietransport findet statt. In Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, ca. 340 m/s. Die Schallschnelle hingegen liegt höchstens bei wenigen Millimetern pro Sekunde.

Die **Ausbreitung des Schalls** geschieht grundsätzlich dreidimensional. Das gilt sowohl für den sprechenden Menschen wie auch für Lautsprecher oder andere Schallquellen. Im idealisierten Fall spricht man von einer Kugelquelle oder auch Punktquelle.

Die **Schallintensität** bildet eine zentrale Größe in der Akustik. Sie drückt aus, wieviel Energie eine bestimmte Fläche durchläuft. Für eine

Kugeloberfläche von 1 m² beträgt die Schallintensität bei einem Watt Energiedurchfluss:

$$I = 1 \frac{W}{m^2} \quad (4)$$

In der Pegelschreibweise wird die Schallintensität auf 10⁻¹² W / m² bezogen:

$$L_I = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) dB \quad (5)$$

Die Schallintensität kann auch als Quotient aus dem Quadrat des Effektivschalldrucks und der Schallkennimpedanz des Ausbreitungsmediums ausgedrückt werden:

$$I = \frac{p_{eff}^2}{Z} \quad (6)$$

Betrachtet man nur ein Medium, so ist die Schallkennimpedanz für alle Intensitäten auf der Oberfläche einer sich im Raum ausbreitenden Schallwelle gleich. Setzt man in diesem Fall (6) in (5) ein, ergibt sich (3). Auch hier ist die Parallele zu den elektrotechnischen Wechselgrößen ersichtlich:

$$P = \frac{U_{eff}^2}{Z} \quad (7)$$

Diese Zusammenhänge von Druck, Schnelle und Intensität beziehen sich nur auf das Fernfeld einer Schallquelle. Besondere Phänomene im so genannten Nahfeld werden hier nicht weiter erläutert, es sei daher auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen [2], [4], [5].

Die eingangs erwähnte abgestrahlte **akustische Leistung**, auch Schalleistung, wird über die Summe der Intensitäten aller Oberflächenelemente gebildet:

$$P_{ak} = \oint I dA \quad (8)$$

Der Schallleistungspegel wird auf 10^{-12} W bezogen:

$$L_w = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{ak}}{P_{ak0}} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

Breitet sich die Schallwelle aus, so vergrößert sich die Oberfläche auf der sich die abgestrahlte akustische Leistung verteilen muss. Die Menge der abgestrahlten Energie bleibt konstant, aber die Intensität sinkt mit größerem Abstand zur Quelle: siehe (8).

Daraus ergibt sich das **Entfernungsgesetz für den Direktschall**. Der Abstand zur Quelle geht quadratisch in die Kugeloberfläche der sich ausbreitenden Welle ein. Die Intensität sinkt bei Abstandsverdoppelung auf ein Viertel ihres vorigen Wertes ab: Das bedeutet eine Pegelabnahme um 6 dB. Die Energieabsorption durch die Luft spielt erst bei sehr großen Entfernungen eine Rolle und ist somit in dieser Arbeit nicht von Bedeutung.

In Räumen trifft der Schall auf Begrenzungsflächen. Es entstehen Reflexionen, der Direktschall und der Diffusschall überlagern sich. Der **Hallradius** gibt die Entfernung von der Quelle an, bei der Direktschall und Diffusschall gleich groß sind.

In der **Nachhallzeit** eines Raumes sinkt der Schallpegel nach Abschalten der Quelle um 60 dB, also auf einen Millionsten Teil, ab. Die Nachhallzeit ist abhängig vom Raumvolumen, den Absorptionseigenschaften der einzelnen Begrenzungsflächen und von der Frequenz. Die Formel von W. C. Sabine zur Berechnung der Nachhallzeit ist am bekanntesten, siehe Anhang 6.3.

Aufgrund der **dreidimensionalen Schallausbreitung** können die Raumeigenschaften, wie hoher Diffusschall oder Nachhall, auch als Problem in der Beschallungstechnik auftreten: Immer dann, wenn sie in der Signalübertragung vom Sender zum Empfänger als negativer Einfluss auf den Rauschabstand S/N wirken.

Um einen besseren Störabstand bei der Beschallung zu erreichen, wird in der Lautsprecherherstellung die **gerichtete Schallabstrahlung** in möglichst

allen Frequenzbereichen als Ziel verfolgt. Der frequenzabhängige **Lautsprecherparameter Q** gibt Auskunft über die Schallbündelung. Dabei wird der in einem bestimmten Abstand auf der Hauptabstrahlachse gemessene Schalldruck ins Verhältnis gesetzt zu dem gemittelten Schalldruck, den die Quelle im gleichen Abstand in alle Richtungen abstrahlt:

$$Q = \frac{P_{r_{\text{aufAchse}}}^2}{P_{r_{\text{gemittelt}}}^2} \quad (10)$$

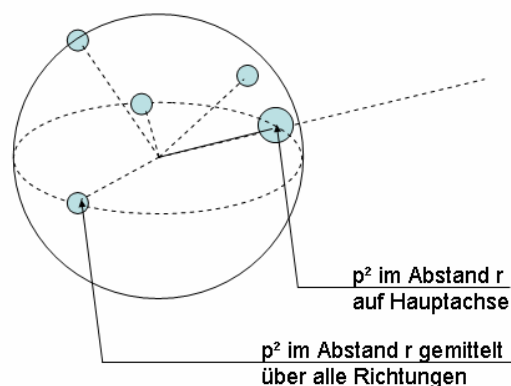


Abb. 1: Bündelungsfaktor Q einer Kugelquelle

Im Falle einer Kugelquelle ist der Schalldruck auf der gesamten Oberfläche überall gleich: Q wird zu 1. Das logarithmische Maß der Bündelung heißt auch Directivity Index:

$$D_I = 10 \cdot \lg Q \text{ dB} \quad (11)$$

Schallführungen, wie Horntrichter vor dem Lautsprecher, steigern den Q-Faktor, sie sind aber für tiefe Frequenzen sehr groß und unhandlich. Ein neuerer Ansatz zur gerichteten Schallabstrahlung zeigt sich mit den Line-Arrays. Hier werden Linienquellen erzeugt, die in vertikaler Richtung sehr stark bündeln. Aber auch bei dieser Methode sind die rundum abstrahlenden tiefen Frequenzen noch nicht zu bändigen.

Die prinzipielle Funktionsweise eines **Schallpegelmessers** nach IEC 651 [24] wird im Folgenden dargestellt: Die Druckschwankungen in der Luft werden mit einem Messmikrofon aufgenommen. Dabei ist das Mikrofon auf die Schallquelle zu richten. Das Signal wird verstärkt und wahlweise mit einer Frequenzbewertung gefiltert. In der Elektroakustik sind der lineare, unbewertete Schalldruckpegel und der nach der Bewertungskurve A gefilterte Pegel am gebräuchlichsten. Nach der Wahl einer Zeitbewertung FAST (125 ms), SLOW (1 s) oder IMPULSE (35 ms) wird der Effektivwert des Signals gebildet. F, S, und I stehen dabei für die Zeit, über die bei der Effektivwertbildung integriert wird. Dieser Wert wird mit dem entsprechenden Wert für die Hörschwelle, Bezugswert $20 \mu\text{Pa}$, ins Verhältnis gesetzt und logarithmiert als Pegel ausgegeben. In Abb. 2 ist der prinzipielle Aufbau eines Schallpegelmessers skizziert.

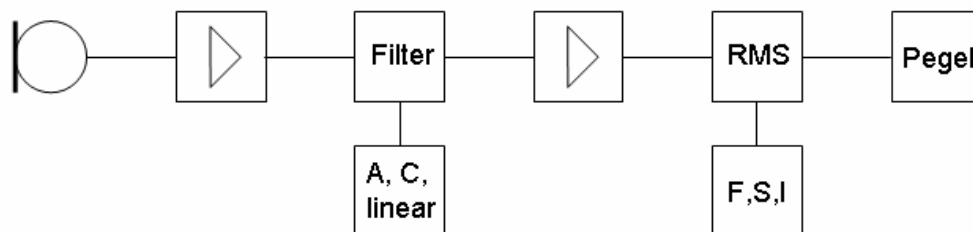


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Schallpegelmessers: Mikrofon, Vorverstärker, Frequenzbewertung, Verstärker, Effektivwertglied mit wählbarer Zeitbewertung und die Pegelausgabe

Frequenzanalytoren sind häufig auch mit den Funktionen der Schallpegelmessers ausgestattet. Zusätzlich zum Frequenzspektrum des Schalls kann so auch der Schalldruckpegel mit Frequenz- und Zeitbewertung gemessen werden.

Die Bewertungskurve A ist dem menschlichen Hörempfinden nachgebildet. Weitere Informationen zu den Bewertungsfiltern und der Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs sind im Anhang und in den Literaturhinweisen zu finden.

2.1.2 ELEKTROTECHNISCHER TEIL: WAS PASSIERT VOR DER ELEKTROAKUSTISCHEN WANDLUNG?

Die Angabe der **elektrischen Leistungsaufnahme** allein sagt noch nichts über das akustische Output eines Lautsprechers aus (siehe Kapitel 2.1). Allerdings erhält dieser Wert landläufig ab am meisten Aufmerksamkeit, wenn beurteilt werden soll, welcher Lautsprecher mehr Leistung bringt. Gemeint ist dabei aber eigentlich die produzierte Lautstärke, die mit der elektrischen Leistungsaufnahme eines Lautsprechers verwechselt wird. Durch die vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrade von Lautsprechern, erreichen die Werte für die abgestrahlte akustische Leistung nach (2) nicht einmal annähernd die angegebenen hohen Werte der maximal umsetzbaren und damit für den eigentlichen Zweck zum Großteil nutzlos verbrauchten elektrischen Leistung.

Der **frequenzabhängige Wirkungsgrad** von Lautsprechern für professionelle Beschallungen liegt nur bei wenigen Prozent, maximal 30 %. Im Hifi-Bereich finden sich Wirkungsgrade $< 1 \%$.

Vielmehr als die zugeführte elektrische Leistung ist das Zusammenspiel der zugeführten **Signalspannung** mit den **Lautsprechereigenschaften** der eigentliche Schlüssel zur Berechnung des Schalldrucks. Die interessanten Eckdaten des Signals sind Spitzen- und Effektivwert, die, ins Verhältnis zueinander gesetzt, den Crest-Faktor bilden sowie die spektrale Zusammensetzung und die Bandbreite des Signals.

Eine Gedächtnisstütze zum **Crest-Faktor**:

$$\text{Crest – Faktor} = \frac{\text{Spitzenwert (engl.: peak)}}{\text{Effektivwert (engl.: rms)}} \quad (12)$$

In logarithmischer Pegelschreibweise wird aus der Division in (12) eine Subtraktion der Pegel.

Der Effektivwert einer Wechselgröße, zum Beispiel einer Wechselspannung, wird gebildet zu:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} \quad (13)$$

Nur für sinusförmige Funktionen ergibt sich der Effektivwert aus (13) zu:

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

Bei den Lautsprechereigenschaften kommen neben dem Wirkungsgrad auch der **Impedanz**, der **thermischen** und **mechanischen Belastbarkeit** eines Lautsprechers und der so genannten **Sensitivity** Bedeutung zu.

Um mit der **frequenzabhängigen Impedanz** eines Lautsprechers besser umgehen zu können, sind Nennimpedanzen auf 4Ω , 8Ω und 16Ω genormt worden. Diese Werte dürfen von der realen Impedanz eines Lautsprechers oder einer Lautsprecherbox um höchstens 20 % unterschritten werden [20].

Die **Grenze der thermischen Belastbarkeit** gibt an, wie viel elektrische Leistung in Wärme umgewandelt werden kann, bevor zum Beispiel die Isolation oder der Klebstoff an der Schwingspule schmilzt. Für diese ständig andauernde Belastung ist der Effektivwert der Signalspannung in Verbindung mit der Lautsprecherimpedanz verantwortlich (7).

Die **mechanischen Grenzen** eines Lautsprechers beschreiben den maximalen Membranhub, bevor die bewegte Schwingspule an den Magneten stößt oder die Membran selbst reißt. Die maximale Auslenkung hängt vom Spitzenwert der Signalspannung ab. Man spricht von der Spitzenbelastbarkeit.

Für den **maximalen Schalldruck**, den ein Lautsprecher zuverlässig erzeugen soll, sind sowohl thermische wie mechanische Grenzen einzuhalten. Da kurze Impulse in ihrer Dauer und in ihrer Amplitude schwer zu erfassen sind - man denke an einen Dirac-Stoß - lassen sich kaum einheitliche Verfahren zur

Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit finden. Die Dauerbelastbarkeit ist jedoch weitaus geringer als die Spitzenbelastbarkeit eines Lautsprechers und stellt damit die erste einzuhaltende Grenze für den sicheren Betrieb dar.

Die **Sensitivity** (Kennschalldruckpegel) eines Lautsprechers sollte nicht mit seinem **Wirkungsgrad** verwechselt werden. Sie gibt den unbewerteten Schalldruckpegel eines Lautsprechers an, der in einem Meter Abstand in Hauptabstrahlrichtung des Lautsprechers messbar ist, wenn im Lautsprecher ein Watt Leistung umgesetzt wird. Dieser Wert sagt nichts darüber aus, welche Schalldruckpegel in anderen Abstrahlrichtungen erwartet werden können. Aber mit Hilfe der Polardiagramme kann eine Orientierung stattfinden. Ein hoher Q-Faktor (10) erhöht auch die Sensitivity.

Zur Messung der Lautsprecherdaten wird von der AES ein breitbandiges Rosa Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB empfohlen [23]. Das Verhältnis Spitzenwert der Signalspannung zu Effektivwert der Signalspannung beträgt also 2:1.

Die **Verstärkerleistung** ist immer in Bezug auf die Nennimpedanz eines angeschlossenen Lautsprechers zu sehen. Sie steht für die Leistung, die mit dem Verstärker an einer Last umgesetzt werden kann. Überlastung des Verstärkers tritt auf, wenn bei zu geringer Lastimpedanz der fließende Strom zu hoch wird. Die Ausgangsspannung und damit auch der Verstärkungsfaktor bleiben nahezu lastunabhängig. In der Realität sinkt die Spannung bei Parallelschaltung mehrerer Lautsprecher etwas.

2.1.3 GRUNDSÄTZLICHES ZU PEGELN

Zum korrekten Umgang mit Pegeln müssen die quadratischen Zusammenhänge zwischen Leistung und Spannung in der Elektrotechnik und in der Akustik zwischen Schalleistung beziehungsweise Schallintensität und Schalldruck beachtet werden (siehe Kapitel 2.1.1). Ein Pegel mit der Angabe Dezibel ist über den zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnissfaktors von Energiegrößen definiert. Ein Pegel ohne Angabe des

Bezugswertes ist unzulässig. Es gilt: ein dB ist ein dB. Eine Änderung im Pegel um x dB ist gleichermaßen wirksam für Spannung, Schalldruck oder Leistungen. Nur der daraus abgeleitete der Verhältnissfaktor ist unterschiedlich. Eine Zusammenfassung ist in Tab. 1 dargestellt:

Elektrotechnische Größen an einer Impedanz	Akustische Größen in einem Ausbreitungsmedium (Schallkennimpedanz)
$\frac{P}{P_0} = \frac{\frac{U_{eff}^2}{Z}}{\frac{U_0^2}{Z}} = \left(\frac{U_{eff}}{U_0} \right)^2$	$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{p_{eff}^2}{Z}}{\frac{p_0^2}{Z}} = \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)^2$
$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_{eff}}{U_0} \right)^2 = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_{eff}}{U_0} \right)$	$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)^2 = 20 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)$

Tab. 1: Verhältnisse und Pegel der Wechselgrößen in der Elektrotechnik und der Akustik

Das menschliche Ohr verhält sich etwas anders als die Technik, dennoch ist die Empfindung der unterschiedlichen Lautstärken ebenfalls logarithmisch in Pegel unterteilt worden. Wir nehmen einen Pegelunterschied von 10 dB als Verdopplung beziehungsweise als Halbierung der Lautstärke wahr. Der kleinste für den Menschen wahrnehmbare Lautstärkenunterschied beträgt 1 dB.

2.2 DREI WEGE ZUR BERECHNUNG VON GESAMTSCHALLDRUCKPEGELN

Zur Berechnung von Gesamtschalldruckpegeln werden in dieser Arbeit drei Verfahren angewendet. Sie sollen auf Zuverlässigkeit und ihre Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis untersucht werden. Der direkte Vergleich der berechneten Ergebnisse und der Werte aus den Messungen soll darüber Aufschluss geben.

2.2.1 MATHEMATISCHE PEGELRECHNUNG

Um zwei oder mehrere auf eine Referenz bezogene Pegel zu addieren oder zu subtrahieren, muss zuerst ein Zwischenschritt in der Berechnung durchgeführt werden: Nur auf entlogarithmierte Werte können diese Rechenoperationen angewandt werden. Für den Gesamtpegel wird anschließend erneut das logarithmische Maß gebildet. Relative Pegel, also Pegeländerungen, können auch logarithmisch mit einander verrechnet werden.

Der Gesamtpegel bei mehreren Quellen berechnet sich aus:

$$L_{ges} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i / 10} \right) \quad (15)$$

Als Bedingung gilt, dass der Bezugswert, die Referenz, bei allen Pegeln derselbe ist. In der Akustik gilt zudem, dass nur Pegel in einem Ausbreitungsmedium, zum Beispiel in der Luft, betrachtet werden dürfen.

Erzeugen zwei Quellen exakt den gleichen Schalldruckpegel, steigt der Gesamtpegel um 3 dB. Unterscheiden sich die beiden Pegel um 10 dB, ist bereits keine Änderung mehr im Gesamtschalldruckpegel zu verzeichnen.

Da die Berechnung nach (15) auf den ersten Blick kompliziert erscheint, finden sich in der Literatur Tabellen und Diagramme, die bei der Berechnung des Gesamtpegels aus zwei Einzelpegeln für Vereinfachungen sorgen: Es genügt anhand der Pegeldifferenz aus den Tabellen und Diagrammen einen Zuschlag für den höheren der beiden Pegel abzulesen. Dieser wird dann einfach addiert. Alle Tabellen und Diagramme basieren auf Berechnungen nach (15). Im Anhang der Arbeit sind Beispiele dazu aufgeführt.

Bei dieser Berechnungsmethode wird mit bereits bestehenden, messbaren Pegeln gerechnet. Die gesamte Schallimmission an einem Ort wird als Ergebnis bestimmt, wenn die Pegel einzelner Schallquellen an genau diesem Ort zur

Berechnung verfügbar sind, zum Beispiel aus Messungen. Das Ergebnis entspricht einem gleichzeitigen Schalleinfall aus allen Quellen an exakt dieser einen Position. An einer anderen Position im Raum kann ein ganz anderes Ergebnis gefunden werden. Es gibt keine Hinweise auf die Einflüsse der Umgebung, der räumlichen Verteilung und der Art der Schallquellen, der Phasenbeziehungen und der daraus entstehenden Interferenzen, oder den Anteilen von Direktschall und Diffusschall. Das Spektrum des berechneten Schallpegels bleibt ebenfalls unbekannt. Diese Berechnung ist nur für eine bestimmte Position gültig. Damit scheidet sie für Vorausberechnungen in der Planungsphase zu einer Beschallungsanlage aus.

Allerdings kann sie zur Verifikation genutzt werden, wenn gemessene oder berechnete Einzelschallpegel vorliegen.

2.2.2 HOPKINS-STRYKER-GLEICHUNG

Die Gleichung nach Hopkins-Stryker berücksichtigt Lautsprecherdaten, Raumeigenschaften und das Entfernungsgesetz. Das Prinzip zur Berechnung lautet:

Gesamtschalldruckpegel = Direktschalldruckpegel + Diffusschalldruckpegel

Die Gleichung für den Direktschallpegel (engl.: direct sound level) einer Schallquelle lautet:

$$L_D = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (16)$$

Die Gleichung für den Diffusschallpegel (engl.: reverberant sound level) in einem Raum lautet:

$$L_R = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{4}{S\bar{a}} \right) \quad (17)$$

$S\bar{a}$ steht dabei für die äquivalente Absorptionsfläche nach W. C. Sabine.

Die abgestrahlte akustische Leistung einer Quelle bringt sowohl den Direktschall hervor, als auch den durch Reflexionen entstehenden Diffusschall in einem Raum. Entsprechend taucht in der Kombination beider Gleichungen (16) und (17) für den Gesamtschalldruckpegel in einem Raum der akustische Leistungspegel nur einmal auf:

$$L_T = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{S\bar{a}} \right) \quad (18)$$

Bei der Umrechnung von der SI-Einheit Meter in US-Längeneinheiten ist der Hopkins-Stryker-Gleichung ein Korrekturglied anzufügen: + 10,3 dB. Es entstammt der logarithmischen Umrechnung von Metern in Fuß.

Die Vorteile der Gesamtschallpegelberechnung mit der Hopkins-Stryker-Gleichung gegenüber der einfachen mathematischen Pegelrechnung sind leicht zu nennen: Erstens die Frequenzabhängigkeit durch den Wirkungsgrad eines Lautsprechers im akustischen Leistungspegel und im Bündelungsfaktor Q der Schallquelle. Durch die äquivalente Absorptionsfläche des beschallten Raumes werden auch die frequenzabhängigen Raumeigenschaften berücksichtigt. Zweitens haben die Entfernung zur Quelle und der Winkel zur Hauptachse des Lautsprechers durch die Änderung von Q ebenfalls Einfluss auf das Ergebnis.

Somit kann festgestellt werden, dass die Hopkins-Stryker-Gleichung für eine lautsprecherabhängige Vorausberechnung des Gesamtschalldruckpegels an jeder Position in einem Raum, dessen Absorptionseigenschaften bekannt sind, geeignet erscheint.

Bei detaillierter Betrachtung fällt auf, dass der Diffusschallpegel in einem Raum nach (17) unabhängig von der Entfernung zur Quelle berechnet wird. Es entsteht also ein ortsunabhängiger Diffusschallpegel. Stellt man sich einen sehr großen Raum vor, erscheint diese Aussage mit Zweifeln behaftet zu sein, eine Vereinfachung der Raumakustik. Ein weiterer Punkt: Bei mehreren Quellen bleiben deren Laufzeitunterschiede, die Phasenbeziehungen der Schwingungen, am Ort der Berechnung des Gesamtpegels unberücksichtigt.

Damit ist die Frage nach der Genauigkeit von Gleichung (18) berechtigt.

An dieser Stelle sei auf die Modifikationen der Hopkins-Stryker-Gleichung im Bezug auf den Diffusschallpegel verwiesen, die in der Fachliteratur [3] nachgelesen werden können. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen nur die hier genannten Gleichungen Verwendung finden, da der Diffusschallpegel alleine erst nach Abschalten der Direktschallquelle messbar wird und dann innerhalb der Nachhallzeit verschwindet. Die Messung des durch einen Lautsprecher verursachten Diffusschallpegels ist in einem ‚normalen‘ Raum so nicht möglich.

2.2.3 SIMULATIONS-SOFTWARE ULYSSES

Das Ingenieurbüro IFBcon entwickelt und vertreibt die Simulations-Software Ulysses: Das CAD-Programm für perfekt berechnete Raum- und Elektroakustik. Mit diesem Programm können Simulationsmodelle erstellt werden, in denen sich Räume, deren Begrenzungsflächen und die Art und Position der Schallquellen leicht editieren lassen. Während dieser Arbeit wurde die Ulysses Version 2.50 verwendet. Inzwischen ist die Version 2.71 veröffentlicht. Abb. 3 zeigt die vier Module der Software Ulysses.

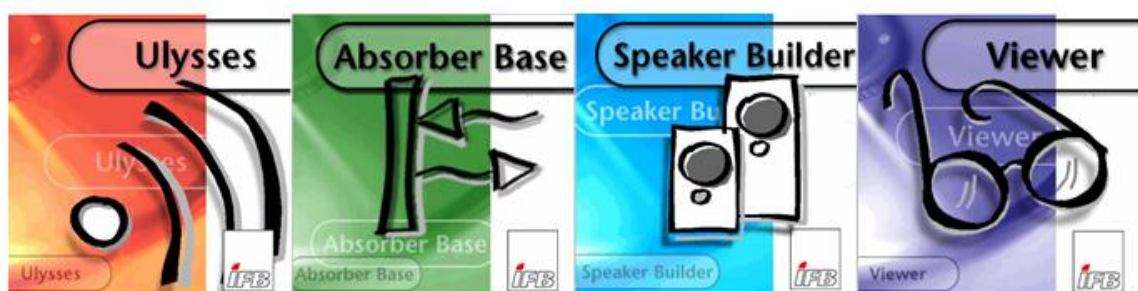


Abb. 3: Die vier Module des Ulysses-Software-Pakets

Die sieben IEC-Oktavbänder von 125 Hz bis 8000 Hz bilden die Basis für die Berechnungen, unter anderem der Schalldruckpegel und der Nachhallzeiten. Entsprechend liegen im Ulysses-Paket auch frequenzabhängige Daten für

Lautsprecher und Absorptionsmaterialien vor.

Die Berechnung der Schalldruckpegel auf einer definierbaren Hörfläche erfolgt unter Berücksichtigung der simulierten Raumakustik. So können frühe Reflexionen beispielsweise dem Direktschall zugeordnet werden. Die Ergebnisse der Simulationen für einen oder mehrere Lautsprecher werden in den einzelnen Oktavbändern sowie in einem Gesamtpegel dargestellt.

Für jedes der sieben Oktavbänder werden die Frequenzen amplituden- und phasenrichtig in der komplexen Ebene addiert. Mit der Eulerschen Identität und der komplexen Zeigerdarstellung ergibt sich für eine Schwingung A:

$$\bar{A} = Ae^{j\varphi} = A(\cos \varphi + j \sin \varphi) = A \cos \varphi + jA \sin \varphi \quad (19)$$

Der Betrag einer komplexen Zahl bildet sich aus:

$$|\bar{A}| = \sqrt{(A \cos \varphi)^2 + (A \sin \varphi)^2} = A \quad (20)$$

Ulysses berechnet für n Quellen den Betrag der Überlagerung in einem Frequenzband zu:

$$A_{Gesamt} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t)\right)^2} \quad (21)$$

Der Ulysses-Anwender kann unter drei Algorithmen für die Genauigkeit der Berechnung in den Frequenzbändern nach (21) auswählen:

1. rein energetische Addition, Phasenunterschiede bleiben unbeachtet

Zur Vereinfachung wird für alle Phasen eine Verschiebung von 90° angenommen. Abwechselnd ergeben sich so für jede Teilschwingung Sinus-

oder Kosinusglieder zu Null, andere werden zu eins. Für n Quellen berechnet Ulysses:

$$A_{Gesamt} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \quad (22)$$

2. Addition nach der Methode Einzelfrequenz

Einzelfrequenz bedeutet, dass die Phasenbeziehungen der Oktavmittenfrequenzen aller Quellen berücksichtigt bleiben. Stellvertretend für das ganze Oktavband wird nur mit der Mittenfrequenz gerechnet, alle anderen Frequenzen werden nicht in die Berechnung nach (21) eingeschlossen:

3. Addition nach der Methode Oktavband

Für jede der drei Terzmittenfrequenzen in einem Oktavband werden Summen nach (21) gebildet. Der Mittelwert der drei Ergebnisse in einem Band entspricht dem Wert nach der Methode Oktavband.

Die Berechnung nach der Methode Oktavband ist die rechenintensivste, sie liefert aber das realistischste Ergebnis.

Für die Ausgabe des Gesamtpegels gewichtet Ulysses anschließend die Ergebnisse aus den einzelnen Oktavbändern:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
7,15 %	17,15 %	17,15 %	17,15 %	17,15 %	17,15 %	7,15 %

Tab. 2: Gewichtung der Gesamtleistung für den Gesamtpegel in Ulysses

Im direkten Vergleich zur Hopkins-Stryker-Gleichung und der einfachen mathematischen Pegelrechnung bietet Ulysses alle Vorzüge computergestützter Berechnungen. Die Möglichkeit der amplituden- und phasenrichtigen Überlagerung der Quellensignale erweist sich als weiterer Pluspunkt. Stichwort: destruktive Interferenz gleichfrequenter harmonischer Schwingungen. Unter der Berücksichtigung anwenderfreundlicher Rechenzeiten müssen Kompromisse in den Berechnungsalgorithmen eingegangen werden. Die jahrelange Erfahrung mit der Software Ulysses gibt den Entwicklern im Bezug auf die Gestaltung der Algorithmen Recht: Die Genauigkeit der Berechnung nach der Methode Oktavband scheint für die Anwendungen realistisch genug zu sein. Die umfangreichen Datenbanken der Lautsprecher und Absorptionsmaterialien werden in Kooperation mit den Herstellern und Akustiklabors auf aktuellem Stand gehalten.

3 MODELLVERSUCHE: VERGLEICH DER ERGEBNISSE AUS BERECHNUNG UND MESSUNG

Als Ansatz für die Auslegung der folgenden Modellversuche dient eine Ideensammlung: Wovon könnte der Gesamtpegel abhängen?

1. Anzahl und Anordnung der Lautsprecher
2. zugeführtes Signal und dessen Crest-Faktor
3. im Lautsprecher umgesetzte elektrische Leistung
4. Höhe des Diffusschalls und die akustischen Raumeigenschaften
5. Laufzeitunterschiede, Kohärenz am Messpunkt

In den Modellversuchen werden bis zu vier baugleiche Lautsprecher des Typs JBL Control 29 AV in unterschiedlichen Anordnungen betrieben. Sechs unterschiedliche Test- und Mess-Signale werden abgespielt. Die Effektivspannung am Lautsprecher wird mit einem Echteffektivwert-Messgerät ermittelt. Die Messung des Schalldruckpegels findet an zwei Positionen in unterschiedlichen Zeit- und Frequenzbewertungen statt. Zum Einsatz kommen dabei ein Präzisionsschallpegelmesser und ein Frequenzanalysator, der auch die Funktion des Schallpegelmessers nach IEC 651 enthält. Zusätzlich werden alle Modellversuche mit einem MLSSA¹-Messcomputer gemessen, der sowohl

¹ Maximum-Length Sequence System Analyser (Melissa)

Impulsantworten, Nachhallzeiten, Frequenzgänge, Schalldruckpegel und weitere für die Raum- und Elektroakustik interessante Parameter berechnen und ausgeben kann. Näheres zu Maximalfolgen (engl.: maximum-length sequence, MLS) kann im Abschnitt 3.2 und in der Literatur nachgelesen werden [2], [5], [13], [14], [22].

Die Modellversuche werden im Freien, ohne ‚Raum‘, und in einem Seminarraum an der Fachhochschule Wiesbaden durchgeführt. Zur Berechnung finden die in Kapitel 2.2 genannten Möglichkeiten ihre Anwendung.

3.1 DIE MESSUMGEBUNGEN

Der **Seminarraum 201** in der Fachhochschule Wiesbaden am Standort Unter den Eichen dient zur Durchführung der Messungen in einem Raum. Zur originalgetreuen Simulation des Raumes mit Ulysses wurden die Raummaße sowie Notizen zur Beschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen aufgenommen.

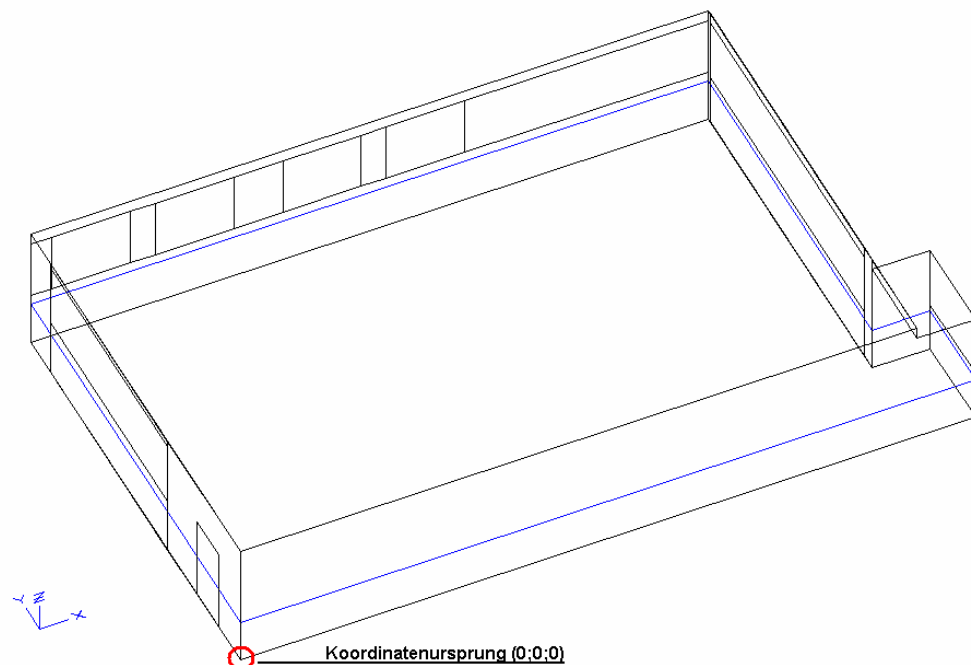


Abb. 4: dreidimensionales Ulysses-Modell des Seminarraums mit Einzelflächen und der blau markierten Hörfläche über dem Boden

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Abb. 4 zeigt das Raummodell mit 30 Einzelflächen, denen unterschiedliche Absorptionseigenschaften zugeordnet sind: Wand, Fenster, Teppichboden, Tafel, um die wichtigsten zu nennen. Die Raummaße ohne Vertiefung in der Ecke betragen:

$$l_x = 14,64 \text{ m}, l_y = 9,70 \text{ m}, l_z = 3,0 \text{ m} \quad (23)$$

Das gesamte Raumvolumen mit der Ecke ergibt sich zu:

$$V = 426 \text{ m}^3 + 7,2 \text{ m}^3 = 433,2 \text{ m}^3 \quad (24)$$

Blau markiert, in 1,05 m Höhe über dem Boden, ist in Abb. 4 die Hörfläche eingezeichnet. Auf dieser Fläche werden die von Ulysses errechneten Pegel dargestellt. Die Lage der Hörfläche orientiert sich an dem realen Versuchsaufbau im Seminarraum: siehe Abb. 5. Der Aufbau gewährleistet, dass Reflexionen an der Tischplatte minimiert sind. Weitere Tische und Stühle im direkten Umfeld des Versuchsaufbaus wurden auf die Seite geräumt. In den Abschnitten zu den einzelnen Versuchen sind weitere kleine Skizzen zur Messanordnung abgebildet.

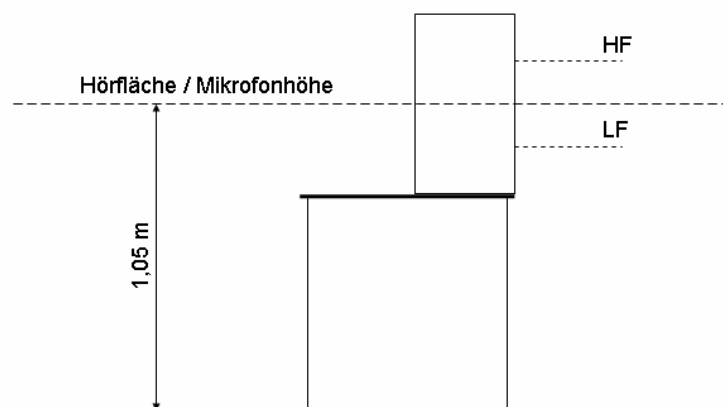


Abb. 5: skizzierter Querschnitt des Aufbaus eines Lautsprecher auf einem Tisch

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Tische, Stühle und Schränke sind in der Simulation nicht berücksichtigt, auch wenn die glatten Tischoberflächen insgesamt eine recht große zusätzliche Reflexionsfläche bilden. Der Vergleich der Simulation der Nachhallzeit im Seminarraum mit der MLSSA-Messung zeigt allerdings keinen erkennbaren Einfluss des Mobiliars. Weitgehend stimmen die Ulysses-Berechnung für die frequenzabhängige Nachhallzeit und die Messung in den einzelnen Oktavbändern überein, siehe Abb. 6:

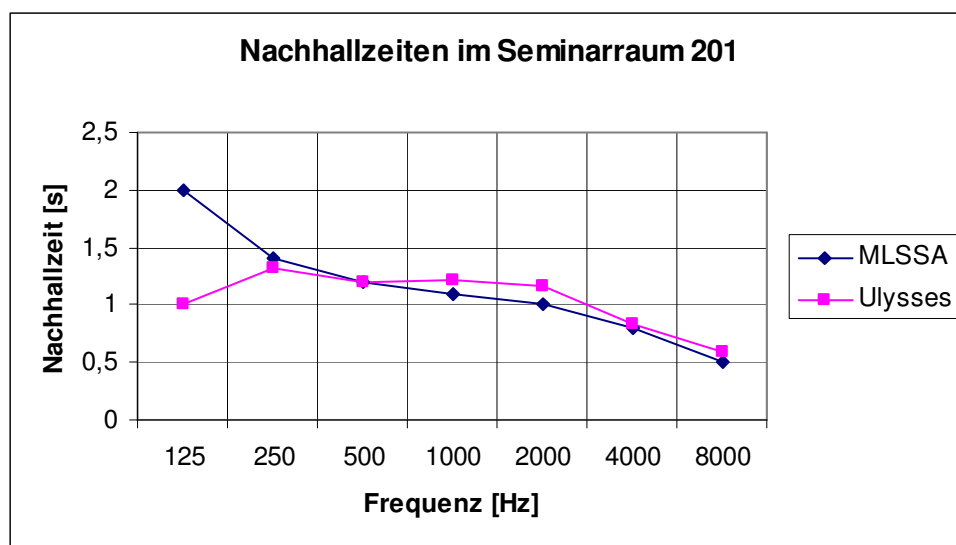


Abb. 6: Nachhallzeiten im Seminarraum, gemessen mit MLSSA und simuliert mit Ulysses

Allein im unteren Frequenzbereich liegen die beiden Darstellungen deutlich auseinander. Dieser signifikante Unterschied erklärt sich nicht durch das in der Simulation fehlende Mobiliar: Ulysses hat die Nachhallzeit nach der Sabine'schen Formel berechnet. Einerseits könnte die Auswahl der absorptiven Eigenschaften für tiefe Frequenzen nicht genau genug sein, andererseits berücksichtigt die Formel von W. C. Sabine nicht die Möglichkeit, dass sich in einem Raum stehende Wellen bilden können. Diese treten vor allem im tieffrequenten Bereich in Erscheinung, wenn die Wellenlängen oder Vielfache davon im Bereich der Raumdimensionen liegen. Ein quaderförmiger Raum, wie

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

der Seminarraum 201, begünstigt dieses Resonanzphänomen [4]: Der Raum behält die Schallenergie im Bereich seiner Eigenfrequenzen (siehe Anhang 6.6) länger, daher steigt die Nachhallzeit für diesen Frequenzbereich. Die Modellierung des Seminarraumes, insbesondere die Auswahl absorptiver Eigenschaften für die Raumbegrenzungsflächen, scheint die Realität in allen anderen Frequenzbereichen sehr nahe zu treffen. Gravierende Messfehler können ausgeschlossen werden, da sämtliche Messungen in der 125 Hz Oktave Nachhallzeiten von knapp 2 Sekunden ergaben.

Mit dem Raumvolumen und der Nachhallzeit (engl.: reverberation time) kann der Hallradius näherungsweise berechnet werden [5]:

$$r_H \approx 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}} \quad (25)$$

Im Falle des Seminarraums 201 liegt der Hallradius bei ungefähr 1 m. Das Grundgeräusch im Seminarraum mit allen Lampen und Geräten eingeschaltet lag bei 46 dB (A), Zeitbewertung FAST.

Das **Freigelände** hinter dem „Uhuz“ in Bischofsheim wurde von IFBcon zur Durchführung der Modellversuche im Freien zur Verfügung gestellt. Eine gartenartige Freifläche mit Wiese, ca. 250 m², die von einem Bahndamm, einer Strasse und dem „Uhuz“-Gebäude selbst begrenzt wird: siehe Abb. 7:

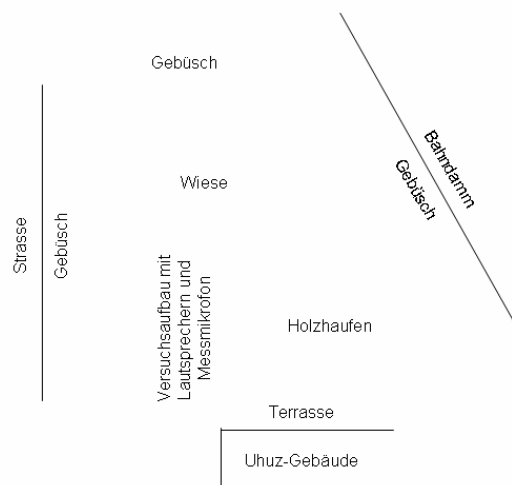


Abb. 7: Lageskizze der Freifläche in Bischofsheim, ca. 250m²

Messungen am Versuchsaufbau zeigten, dass bei Straßenverkehr von einem Hintergrundgeräusch mit Schalldruckpegeln bis 65 dB (A), Zeitbewertung FAST, ausgegangen werden muss. Ohne Straßenverkehr waren 52 dB (A), Zeitbewertung FAST, messbar. Bei vorbeifahrenden Zügen, die auf der Wiese Schalldruckpegel bis 90 dB (A) FAST erzeugten, wurden die Messungen wiederholt. Die Messungen fanden bei sonnigem Wetter mit leichtem Wind statt. Die Temperatur lag zwischen 15 °C und 20 °C.

In der Simulationssoftware Ulysses ist die Freifläche lediglich mit einer Hörfläche ohne begrenzenden Raum nachgebildet. Reflexionen vom Boden werden so bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

3.2 DIE TEST- UND MESS-SIGNALE

Folgende Test- und Mess-Signale kommen während der Modellversuche zum Einsatz:

1. Sinuston 1 kHz

2. sehr **schmalbandiges Rosa Rauschen**. Die Mittenfrequenz liegt ebenfalls bei 1 kHz, die Bandbreite beträgt 1/6 Oktave. Das Verhältnis von oberer zu unterer Grenzfrequenz eines Frequenzbandes wird nach [1], [4], [5], [25] gebildet zu:

$$\frac{f_o}{f_u} = 2^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

Mit $n > 0$. In diesem Fall ist $n = 6$.

Die oberen und die unteren Grenzfrequenzen können mit der Mittenfrequenz berechnet werden:

$$f_m = \sqrt{f_o \cdot f_u} \quad (27)$$

Setzt man (26) in (27) ein, ergeben sich die Grenzfrequenzen bei einer Mittenfrequenz von 1 kHz zu 944 Hz und 1059 Hz. Die Bandbreite von 1/6 Oktave bei der Mittenfrequenz 1 kHz beträgt also 115 Hz.

3. breitbandiges Rosa Rauschen

4. Sprache

5. Rock-Musik

Diese fünf Signale werden von einer Audio-CD abgespielt. Für alle Signale gilt: 44,1 kHz Abtastrate, 16 Bit Quantisierungstiefe, mono, Vollaussteuerung, 6 dB Crest-Faktor (außer Sinuston und Sprache), 10 Sekunden Dauer zuzüglich Ein- und Ausblende sowie drei kurzen Signaltönen am Anfang des CD-Tracks. Die Gesamtlänge eines CD-Tracks beträgt ca. 20 Sekunden.

Der Sinuston und das Rauschen wurden in der Software Cool Edit Pro erzeugt, mit der auch die Bearbeitung und die Analyse der Signale vorgenommen wurde. Dieses Programm zur Audibearbeitung konnte, wie sämtliches Equipment, von IFBcon zur Verfügung gestellt werden. Das Sprachsample ist als Beispiel im Ulysses-Paket enthalten. Die Musik ist aus einer zeitgemäßen Studioproduktion - Veröffentlichung im Jahr 2004 - ausgeschnitten.

Bei einer 16 Bit Quantisierung ($2^{16} = 65536$ Stufen) liegen die Werte für die Signalamplitude zwischen -32768 und $+32767$ ($2^{15} - 1$; wegen Stufe Nr. 0). Vollaussteuerung bedeutet: der Signalspitzenwert erreicht die Quantisierungsstufen $+32767$ oder -32768 . Wird dieser Wert zum Bezugspunkt, kann die Amplitude als Pegel ausgedrückt werden:

$$0 \text{ dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{32767}{32767} \right) \quad (28)$$

Abb. 8 zeigt die Analyse des Signalverlaufs von dem hier verwendeten breitbandigen Rosa Rauschen als Ausschnitt eines Screen-Shots aus Cool Edit. Das erzeugte Rauschen wurde soweit verstärkt, dass es einen Crest-Faktor von 6 dB aufweist. Unbearbeitetes Rauschen hat einen Crest-Faktor von ca. 12 dB. Die Signalspitzen sind bei der Bearbeitung abgeschnitten worden, da keine Amplituden verarbeitet werden können, die die Aussteuerungsgrenze von 0 dB

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

nach (28) überschreiten. Aus der digitalen Übersteuerung entstandene Verzerrungsgeräusche sind bei einem Rauschsignal nicht mehr hörbar. Der Spitzen- und der Effektivpegel des Amplitudenverlaufs sowie der mögliche Wertebereich für die Signalamplitude bei einer Quantisierung mit 16 Bit sind in Abb. 8 rot unterstrichen. Abb. 9 zeigt das Spektrum von Rosa Rauschen.

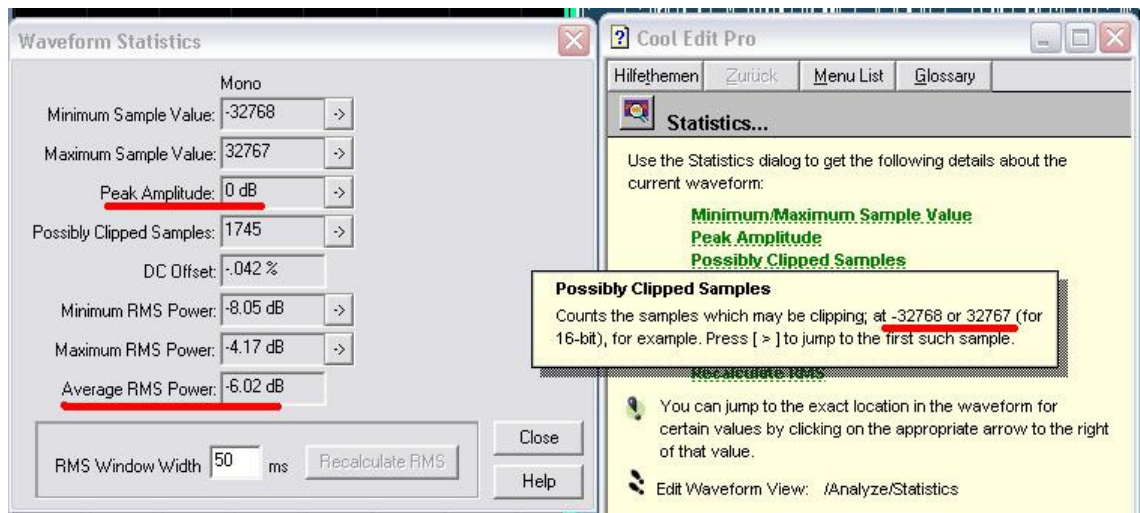


Abb. 8: Analyse des Signalverlaufs von Rosa Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB; Ausschnitt eines Screen-Shots aus Cool Edit Pro

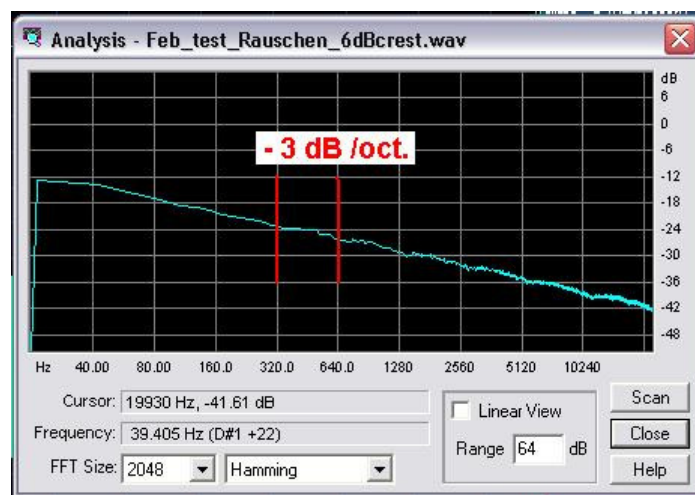


Abb. 9: Frequenzanalyse in Cool Edit Pro: Das Spektrum von Rosa Rauschen fällt mit 3 dB pro Oktave (Frequenzverdoppelung)

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Der Sinuston hat nach (14) einen Crest-Faktor von 3 dB. In der digitalen Analyse von Cool Edit Pro, in Abb. 10 dargestellt, ist dieser Wert nicht erkennbar, obwohl die Schwingung mit 44 Werten abgetastet wird (Abtastrate einer Audio-CD: 44,1 kHz). Nach dem bekannten Abtasttheorem von Shannon genügen 2 Abtastungen, um eine Sinusschwingung korrekt wiederzugeben.

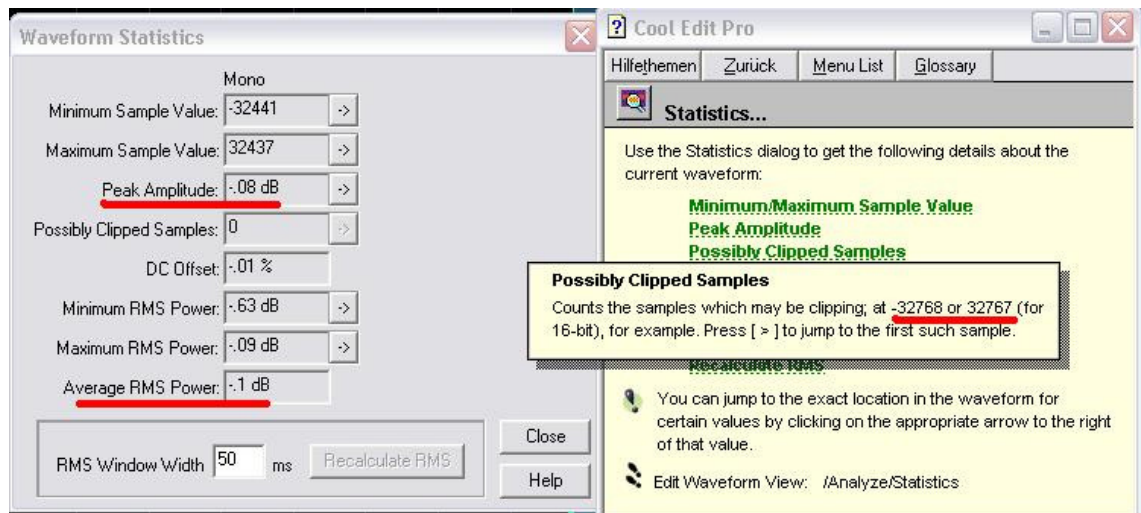


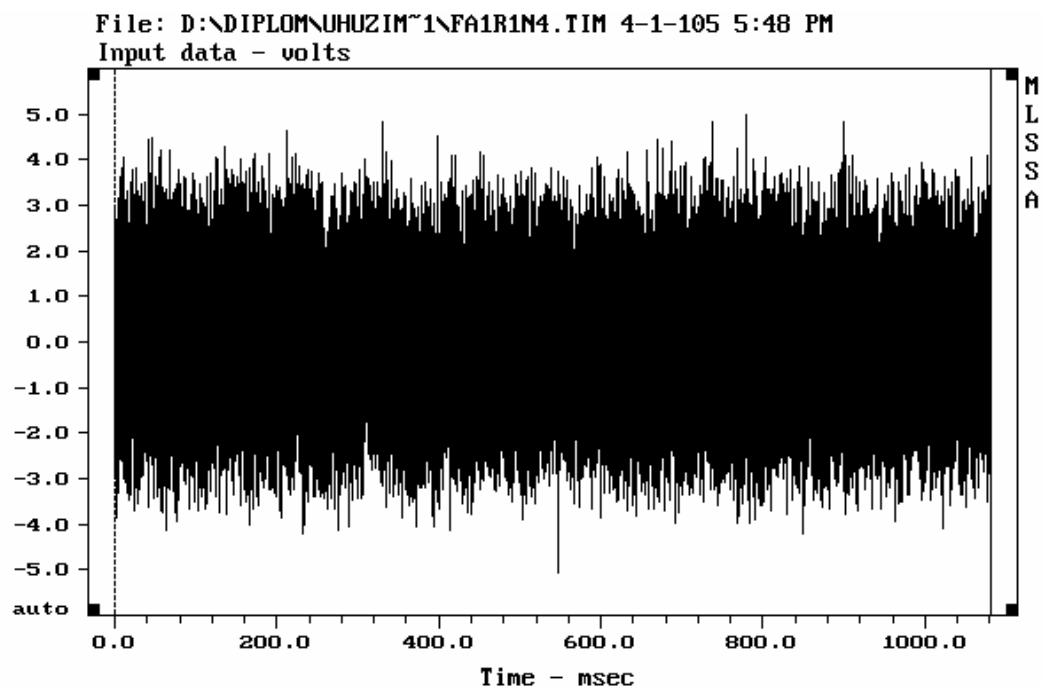
Abb. 10: Analyse des Signalverlaufs des Sinustons mit der Frequenz 1 kHz. In der digitalen Analyse ist der ‚analoge‘ Crest-Faktor einer Sinusschwingung nicht abzulesen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit dient der mathematisch ermittelte Crest-Faktor einer Sinusschwingung nach (14) mit 3 dB als Berechnungsgrundlage. Das hier dargestellte Ergebnis aus der Cool Edit-Analyse ist für die Arbeit nicht weiter relevant und bleibt damit unberücksichtigt.

Die Analysen aller Signale aus Cool Edit können im Anhang nachgelesen werden. Das Sprach-Sample hat einen Crest-Faktor von 16 dB.

Als sechstes Mess-Signal wird das vom MLSSA-Computer generierte binäre **MLS-Signal (Maximalfolgen)** verwendet. MLSSA nutzt die Methoden der Korrelationsmesstechnik – die Analyse der Verwandtschaft oder Ähnlichkeit zweier Zeitfunktionen [4], [5], [22]: Das erzeugte Rechtecksignal ist pseudo-zufällig und periodisch, seine Autokorrelationsfunktion (Ergebnis der Korrelation

mit sich selbst) ähnelt einer Folge von Dirac-Stößen. Nachdem das MLS-Signal das zu messende lineare zeitinvariante System durchlaufen hat, kann durch die Kreuzkorrelation mit der Autokorrelationsfunktion der ursprünglichen Maximalfolge (MLS) die Impulsantwort des Systems berechnet werden. Sie dient als Grundlage für alle weiteren Berechnungen, die mit der MLSSA durchgeführt werden können. Der Zeitverlauf einer MLS ähnelt nach der D/A-Wandlung einem Rauschen.



Crest factor: 3.886, 11.79 dB

TIME DOMAIN MENU: Go View FFT Waterfall Acquisition Setup Transfer Macro
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Quit

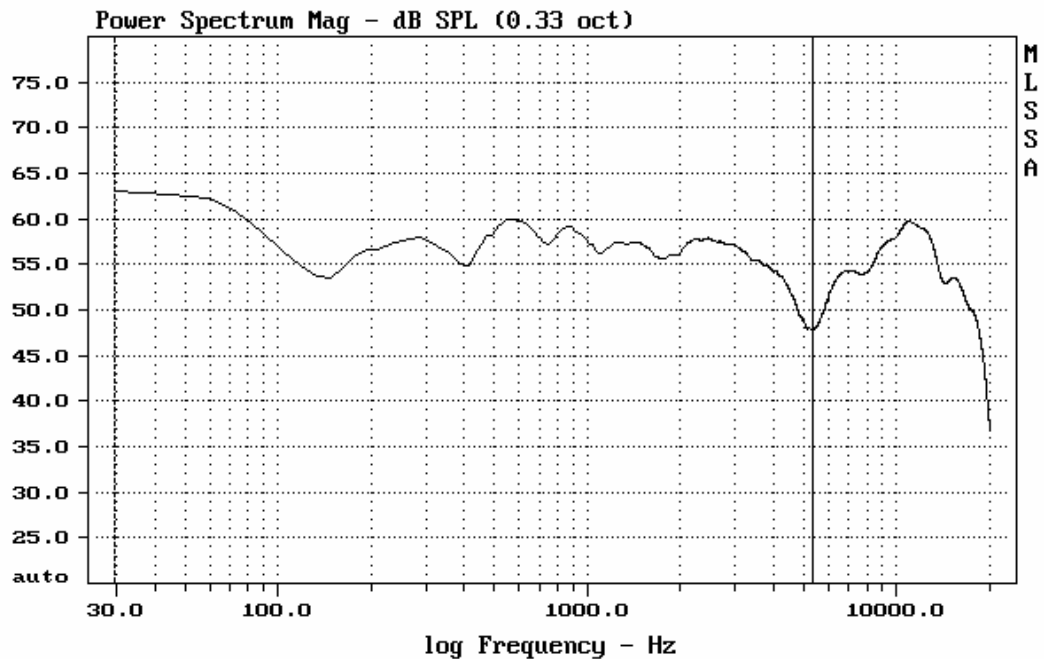
F1 for Help

MLSSA: Time Domain

Abb. 11: Screen-Shot aus der MLSSA: Zeitverlauf eines MLS-Signals wiedergegeben durch einen Lautsprecher

Abb. 11 zeigt den Zeitverlauf des MLS-Rauschens. Das Signal ist bereits durch das System, bestehend aus Lautsprecher, Raum und Mikrofon, wieder zurück zur MLSSA gelangt. Nach der A/D-Wandlung ist es in der MLSSA möglich den Zeitverlauf des Signals anzuzeigen, bevor die Kreuzkorrelation und damit die

Impulsantwort des Systems berechnet werden. Der Crest-Faktor des analogen MLS-Signals beträgt wie beim herkömmlichen Rauschen 12 dB. Auch das Spektrum reicht über den gesamten Frequenzbereich.



CURSOR: y = 47.6941 x = 5356.2973 (362)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Abb. 12: *Frequenzgang der MLS - in der Darstellung auf Terzbänder geglättet*

In Abb. 12 ist das Spektrum abgebildet, das wie die Zeitdarstellung den Einfluss des Systems beinhaltet. Eine leichte Kammfilterstruktur mit einem doch deutlichen Einbruch an der Cursor-Position deutet auf die destruktiven Interferenzen durch die Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen. In diesem Fall muss es sich um Bodenreflexionen handeln, da die Darstellungen in Abb. 11 und Abb. 12 auf Messungen an einem Lautsprecher im Freien beruhen. Die berechneten Pegel sind laut MLSSA-Handbuch [22] von der Länge der FFT und der Sample-Rate abhängig, sie stellen also nicht real

messbare Schalldruckpegel dar. Diese Frequenzgangdarstellung ist nur zur Bestimmung der relativen Schallverteilung geeignet.

3.3 DIE MODELLVERSUCHE

Im Abschnitt 3.3.1 zum ersten Modellversuch werden alle Berechnungswege und die vielfältigen Messungen detailliert beschrieben und diskutiert. Dies bietet sich an, da zuerst nur mit einer Quelle gerechnet und gemessen wird. Stellvertretend für alle darauf folgenden Modellversuche werden im Abschnitt 3.3.1. sämtliche Zwischenschritte vor allem in der Berechnung des Schalldruckpegels eines Lautsprechers durchlaufen.

Die weiteren Abschnitte zu den Modellversuchen mit zwei und vier Lautsprechern jeweils im Freien und im Seminarraum sind dann hauptsächlich den Endergebnissen gewidmet. Die berechneten und gemessenen Gesamtpegel sowie deren Vergleich mit den anderen Modellversuchen bilden die Schwerpunkte.

Um mit den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verfahren rechnen zu können, werden zusätzliche Daten benötigt.

Die mathematische Pegelrechnung (15) kann nur mit vorliegenden Pegeln für den Betrachtungspunkt durchgeführt werden. In den Modellversuchen kommen diese Ausgangsdaten zur Berechnung des Gesamtpegels von den Messungen einzelner Pegel am Betrachtungspunkt. Die von den Lautsprechern am Messpunkt erzeugten Pegel werden also zuerst einzeln gemessen, anschließend mittels mathematischer Pegelrechnung addiert und mit dem Messergebnis für den Gesamtpegel verglichen.

Für die Hopkins-Stryker-Gleichung (18) sind wesentlich mehr Daten erforderlich. Zuerst müssen frequenzabhängige Lautsprecherdaten bekannt sein: Für die Berechnung des Schalleistungspegels (9) sind Wirkungsgrad (2), Impedanz und zugeführte Spannung (7) erforderlich. Der Wirkungsgrad wurde aus dem Datenblatt der Ulysses Speaker-Builder-Datenbank für den

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

verwendeten Lautsprecher JBL Control 29 AV abgelesen. Im Herstellerdatenblatt waren dazu keine Informationen zu finden. Im Ulysses-Datenblatt ist nur die Nennimpedanz mit 8 Ohm aufgeführt. Die Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Lautsprecherimpedanz auf dem Herstellerdatenblatt ist nur qualitativ abzulesen, da aus Platzgründen drei unterschiedliche Kurven in nur einem Diagramm untergebracht wurden. Mit MLSSA können auch Lautsprecherimpedanzen gemessen werden. Um die Frequenzabhängigkeit der Impedanz in den Berechnungen nach Hopkins-Stryker zu berücksichtigen, wurden die Impedanzkurven der vier verwendeten Lautsprecher mit dem MLSSA-Messcomputer ermittelt. Die aus den vier Messungen für die IEC-Oktavbänder abgeleiteten Werte sind in Tab. 3 aufgelistet. Der Anstieg der Impedanz im tiefen und im hohen Frequenzbereich entspricht dem prinzipiellen Verlauf eines elektrodynamischen Lautsprechers [2]. Sämtliche Impedanzkurven der verwendeten Lautsprecher sind im Anhang abgebildet.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
9 Ω	6,65 Ω	7,9 Ω	8 Ω	7,8 Ω	20 Ω	13,5 Ω

Tab. 3: frequenzabhängige Impedanz der JBL Control 29 AV gemessen mit MLSSA als Grundlage für die Berechnungen mit Hopkins-Stryker

Der Bündelungsgrad Q (10) oder das Bündelungsmaß (11) kann aus den Datenblättern entnommen werden, die der Hersteller liefert, oder auch aus dem Ulysses-Datenblatt für den entsprechenden Lautsprecher. Des Weiteren ist für die Berechnung mit der Hopkins-Stryker-Gleichung (18) Kenntnis über die Raumakustik nötig. Die äquivalente Absorptionsfläche nach Sabine (Anhang 6.5) wird in dieser Arbeit aus der Ulysses-Simulation übernommen, da die Übereinstimmung mit den Messwerten für die Nachhallzeit keine Zweifel an der Raumsimulation hinterlässt. Alternativ kann die frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche auch über die Sabine'sche Nachhallformel berechnet werden: Das Raumvolumen (24) und die Nachhallzeiten sind aus den

Messungen im Seminarraum bekannt, vergleiche Abb. 6. Diese Alternativberechnung wurde ebenfalls mit Ulysses durchgeführt, da auch gemessene Nachhallzeiten in die Simulations-Software eingegeben werden können, mit denen Ulysses die äquivalente Absorptionsfläche nach Sabine berechnet. Der Vergleich von simulierter Absorptionsfläche mit der nach Messwerten berechneten Absorptionsfläche verhält sich wie die Gegenüberstellung der Nachhallzeiten in Abb. 6. Der Abstand zur Quelle, als letztes Glied in der Berechnung nach (18), hängt schließlich nur vom Aufbau beziehungsweise von der Anordnung von Quelle und Betrachtungspunkt ab. Je nach Situation spielt auch der Winkel zur Hauptabstrahlrichtung des Lautsprechers eine Rolle: Das Abstrahlverhalten ist nicht in jede Richtung gleich - der Bündelungsfaktor Q (10) variiert, siehe auch Abb. 1.

Die Berechnung der Pegel in der Ulysses-Simulation beruht in erster Linie auf den verwendeten Daten aus der Absorber-Base (Programm-Modul zur Verwaltung der Absorptionseigenschaften unterschiedlicher Materialien) und aus dem Speaker-Builder (Programm-Modul zur Verwaltung der Lautsprechereigenschaften), der Lage der Hörfläche und der modellierten Raumform. Anstatt der simulierten Nachhallzeiten kann auch mit eingegebenen Messwerten gerechnet werden. Für jeden Lautsprecher in der Ulysses-Simulation kann die Anschlussleistung eingestellt werden. 0 dB entsprechen der im Ulysses-Lautsprecher-Datenblatt angegebenen Nennleistung nach der AES-Empfehlung [23]: Im Fall der JBL Control 29 AV beträgt die Nennleistung 150 Watt. Sie stellt den letzten zuverlässigen Wert für den stabilen Betrieb vor dem Erreichen der thermischen Belastungsgrenze dar, siehe Kapitel 2.1.2 Elektrotechnischer Teil: Was passiert vor der elektroakustischen Wandlung?.

Nach einer Orientierungsmessung zur Abschätzung der produzierten Lautstärke in den Messumgebungen, wird die zugeführte elektrische Effektivspannung nach (2) und (7) für die Modellversuche festgelegt:

1. im Freien:
$$U_{eff} = 2,8 V \quad (29)$$

2. im Seminarraum:
$$U_{eff} = 0,7 V \quad (30)$$

So entsteht ein grundsätzlicher Versatz von 12 dB zwischen den Pegelmessungen im Freien und den Pegelmessungen im Seminarraum. Die unterschiedlichen Ansteuerungen in den Messumgebungen sind einerseits durch den höheren Geräuschpegel im Freien und andererseits durch die Akustik im Seminarraum bedingt. Um die Vergleiche zwischen Berechnung und Messung einfacher zu halten, werden den Berechnungen ebenfalls die entsprechenden Effektivspannungen zugrunde gelegt.

Für die Eingabe der Lautsprecheransteuerung in Ulysses wird die zugeführte elektrische Leistung nach (7) in Verbindung mit der Nennimpedanz und den für die Modellversuche festgelegten Effektivspannungen berechnet:

1. im Freien:
$$P_{el} = \frac{U_{eff}^2}{Z_N} = 0,98 W \quad (31)$$

Bezogen auf die Nennleistung von 150 Watt, ergibt sich zur Eingabe der Ansteuerungsleistung ein elektrischer Leistungspegel von:

$$L_{P_{el}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{0,98}{150} \right) = -22 dB \quad (32)$$

2. im Seminarraum entsprechend nach (30), (31), (32):

$$L_{P_{el}} = -34 dB \quad (33)$$

Die Festlegung der Effektivspannung für die Modellversuche lässt eine Untersuchung des Maximalschalldruckpegels in Verbindung mit der Spitzenbelastbarkeit der verwendeten Lautsprecher nicht zu. Da die Untersuchungen aber im linearen Bereich des Systems, bestehend aus Lautsprecher, Raum und Mikrofon, stattfinden, behalten die Beziehungen der Ergebnisse zueinander bis zum Übergang in die Nichtlinearität des Systems ihre Gültigkeit. Dieser Übergang bildet die Grenze des zuverlässigen Betriebs

bevor die Dauerbelastbarkeit überschritten wird und Einflüsse thermischer Überlastung akustisch, mechanisch oder elektrisch in Erscheinung treten.

3.3.1 ERSTER MODELLVERSUCH

Im ersten Modellversuch wird nur ein Lautsprecher angeschlossen. Die Berechnungen und Messungen finden für Punkte in 1 m und 4 m Entfernung auf der Hauptachse des Lautsprechers statt. Abb. 13 zeigt eine Skizze des Aufbaus, der sich nach Abb. 5 in 1,05 m Höhe über dem Boden befindet.

Da es sich in dieser Anordnung nur um eine Quelle handelt, ist eine Gesamtpegelberechnung nach der mathematischen Pegelrechnung (15) nicht möglich. Für die Berechnung der Pegel im Freien wird nach Hopkins-Stryker die Gleichung für den Direktschall (16) verwendet; für die Berechnung im Seminarraum folglich Gleichung (18). Die frequenzabhängigen Lautsprecherdaten sind dem Ulysses-Datenblatt entnommen, siehe Anhang 6.9.

Anordnung 1

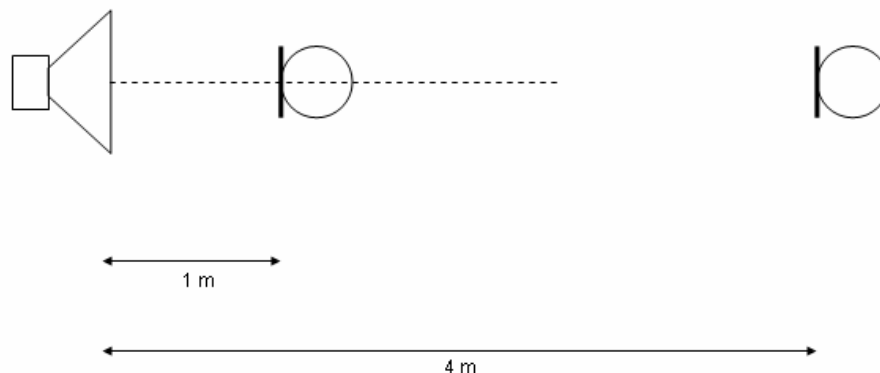


Abb. 13: Skizze zu Anordnung 1: Der Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher beträgt 1 m bzw. 4 m

In Verbindung mit dem gemessenen Wert für die Effektivspannung (29), der frequenzabhängigen Impedanz aus Tab. 3 und den Formeln (2), (7), (9), (16)

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

ergeben sich folgende Werte für den Lautsprecher im Freien, die in Tab. 4 aufgelistet sind. L_d dB SPL steht für den unbewerteten Direktschalldruckpegel nach (16); L_d dB (A) kennzeichnet das mit der Bewertungskurve A gefilterte Ergebnis aus (16).

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
P_{el} [W]	0,871	1,179	0,992	0,98	1,005	0,392	0,581
P_{ak} [W]	0,005	0,008	0,006	0,004	0,002	0,0008	0,0006
L_w [dB]	97,18	99,16	97,75	95,93	93,03	88,94	87,64
L_d dB SPL, $r=1m$	87,53	91,80	91,87	92,13	91,88	87,18	86,29
L_d dB SPL, $r=4m$	75,49	79,76	79,83	80,09	79,84	75,14	74,25
A-Bewertung in dB:	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1	-1,1
L_d dB (A), $r_1=1m$	71,43	83,20	88,67	92,13	93,08	88,18	85,19
L_d dB (A), $r_2=4m$	59,39	71,16	76,63	80,09	81,04	76,14	73,15

Tab. 4: frequenzabhängige und gerundete Ergebnisse für einen Lautsprecher im Freien nach Hopkins-Stryker (16)

Betrachtet man alle Pegel in den einzelnen Bändern als gleichzeitig am Messpunkt messbare Pegel, wie zum Beispiel bei einem breitbandigen Signal, liegt es nahe mit der mathematischen Pegelrechnung (15) den Gesamtpegel über den gesamten Frequenzbereich zu berechnen. Die frequenzunabhängige Effektivspannung, die den Berechnungen in allen Oktavbändern zugrunde liegt, wird dabei auch aufsummiert: Als würde diese Spannung gleichzeitig sieben Quellen zugeführt. Das Ergebnis für den Gesamtpegel entspräche der siebenfachen Energie, obwohl nur ein Lautsprecher betrieben wird.

Ähnlich der Gewichtung der Gesamtleistung im Berechnungsalgorithmus

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

von Ulysses, dargestellt in Tab. 2, soll im Folgenden der Faktor 7 (8,45 dB) in der Berechnung des Gesamtpegels über den Frequenzbereich beachtet werden:

$$L_{ges} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{7} \cdot \sum_{i=1}^7 10^{L_i/10} \right) = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^7 10^{L_i/10} \right) - 8,45 \text{ dB} \quad (34)$$

Der Gesamtpegel über den Frequenzen aus Tab. 4 ergibt sich nach (34) zu:

	Ld dB SPL	Ld dB(A)		Ld dB SPL	Ld dB(A)
r1	90,24	88,84	r2	78,20	76,80

Tab. 5: gerundete Pegel für den gesamten Frequenzbereich nach (16) und (34)

Ulysses berechnet den Direktschallpegel für beide Punkte nach den in Abschnitt 2.2.3 erwähnten Methoden und gibt den Gesamtpegel über alle Frequenzbänder gewichtet nach Tab. 2 aus:

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	ϕ
Einzelfreq. r1	86,8	89,6	90,8	90,6	89,6	88,6	88,5	89,7
r2	75,2	78,2	79,2	79,2	78,2	77	76,6	78,2
Oktavband r1	85,7	88,6	89,7	89,6	88,6	87,5	87,4	88,6
r2	75,2	78,2	79,2	79,2	78,2	77	76,5	78,2
Energetisch r1	85,7	88,6	89,7	89,6	88,6	87,5	87,4	88,6
r2	75,2	78,2	79,2	79,2	78,2	77	76,6	78,2

Tab. 6: Ergebnisse aus Ulysses für Anordnung 1 im Freien

Die Berechnungen nach Hopkins-Stryker (Tab. 5) und Ulysses (Tab. 6) stimmen für eine Quelle ohne Einflüsse durch einen Raum recht gut überein.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Klar zu erkennen ist, dass die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Algorithmen in Ulysses keine unterschiedlichen Ergebnisse hervorbringen. Das erklärt sich durch die nicht existierenden Phasen- und Amplitudenunterschiede in der Simulation: nur eine Quelle, kein Raum.

Abb. 14 zeigt das Rechenergebnis für Anordnung 1 im Freien aus Ulysses nach der Methode Oktavband. Die Simulation besteht nur aus einem Lautsprecher JBL Control 29 AV und einer Hörfläche mit Radius 10 m. Die Anordnung von Lautsprecher und Hörfläche entspricht Abb. 5. Minimum im Bilduntertitel gibt die Rastergröße der Hörfläche an in der die Ergebnisse der Berechnung dargestellt werden [21]: 16000 Rasterpunkte werden gleichmäßig über der Hörfläche verteilt. Alle Simulationen in dieser Arbeit wurden mit der Rastergröße Minimum durchgeführt.

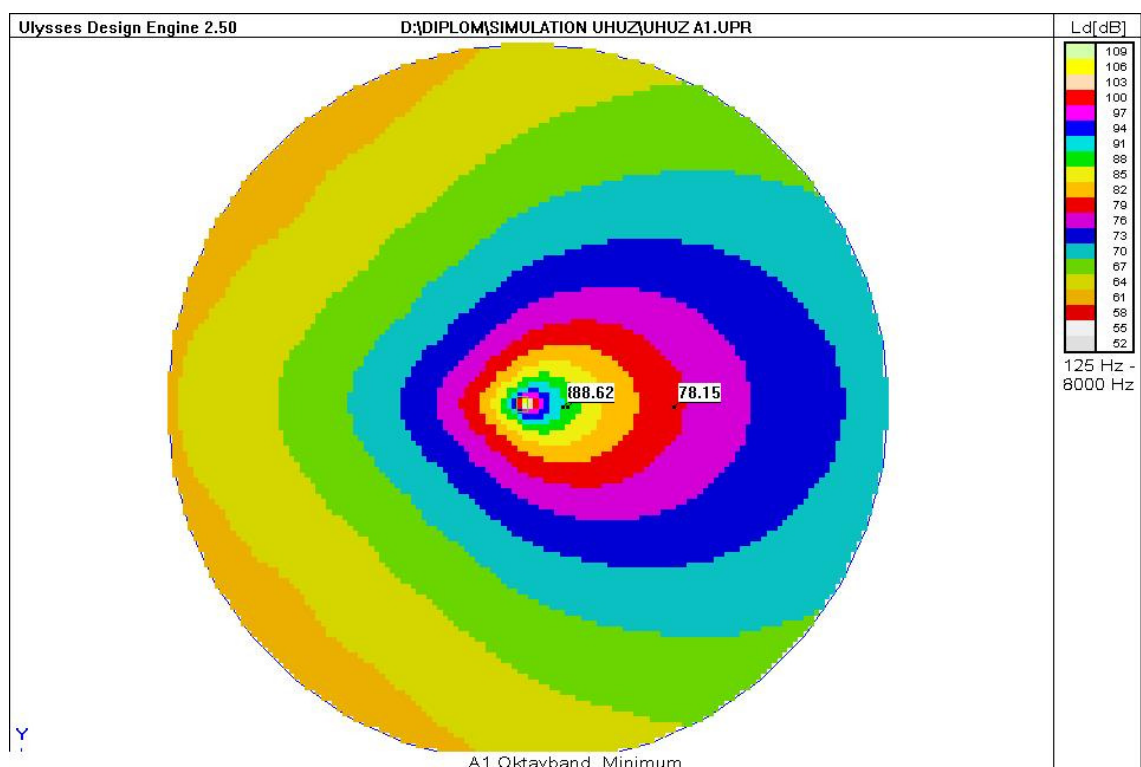


Abb. 14: Draufsicht auf die Simulation von Anordnung 1 im Freien. Im Mittelpunkt der Hörfläche befindet sich der Lautsprecher

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Mit dem Audio-Analyser Klark Technik DN6000 wurden unbewertete und mit der Bewertungskurve A gefilterte Schalldruckpegel in den Zeitbewertungen Fast, Slow und Impulse gemessen. Zum Vergleich wurde auch der Präzisionsschallpegelmesser FS18 verwendet.

Bei den in Tab. 7 aufgelisteten Messergebnissen ist nur ein geringer Einfluss der Zeitbewertung zu erkennen. Die Crest-Faktoren der Signale betragen nach Abschnitt 3.2 alle 6 dB oder sind sogar kleiner, wie der Sinus mit 3 dB Crest-Faktor.

	r	Klark dB SPL			Klark dB(A)			FS18 dB(A)
		F	S	I	F	S	I	F
CD-Track	r							
Sinus 1 kHz	r1	93	93	94	93	93	93	95
	r2	83	83	83	83	83	83	82
Pink Noise 1/6 oct	r1	94	94	94	94	94	94	95
	r2	85	84	88	83	83	85	82
Pink Noise ungefiltert	r1	93	93	93	91	91	91	88
	r2	83	83	86	79	79	80	78
Rock-Musik	r1	93	93	94	91	91	92	90
	r2	84	84	84	80	80	82	80

Tab. 7: Messergebnisse Anordnung 1 im Freien

Dieser Unterschied zwischen Spitzen- und Effektivwert im Signal ist mit dem Schallpegelmesser von Klark kaum noch messbar beziehungsweise aufgrund der sich schnell ändernden Sieben-Segmentanzeige kaum ablesbar. Die Peak-Hold-Funktion des Analysers war intuitiv nur schwierig zu bedienen und führte zu großem Zeitverlust während den Messungen, daher kam diese Funktion nur

spärlich zum Einsatz. Mit der Einstellung Impulse sollten vor allem die Signalspitzen erfasst werden können, die in der Messung im Modus Slow gegenüber dem Effektivwert des Signals einen verschwindend kleinen Teil ausmachen.

Das Sprach-Sample weist einen höheren Crest-Faktor auf. Wegen der unvorhersehbaren Schwankungen des Umgebungsgeräuschpegels wurde im Freien auf Messungen mit dem Sprach-Sample verzichtet. Zu erwartende Schwankungen des Schalldruckpegels bei der Beschallung mit dem hohen Crest-Faktor des Sprach-Samples wären bei erträglichen Lautstärken nur sehr schwer von den Schwankungen des Geräuschpegels zu unterscheiden gewesen. Im Seminarraum an der Fachhochschule wurde auch das Sprachsignal gemessen.

Deutlich erkennbar ist in Tab. 7 der Einfluss der A-Bewertung bei Signalen mit breitem Spektrum, wie dem ungefilterten Rauschen oder der Musik. Tieffrequente Signalanteile werden stark abgedämpft, so dass der Gesamtpegel über alle Frequenzen im Vergleich zum signalunabhängigen unbewerteten Schalldruckpegel nach (29) etwas abfällt.

Die theoretisch messbaren Pegelunterschiede von 12 dB bei Vervielfachung des Abstandes werden hier nicht ganz erreicht. Das Entfernungsgesetz gilt nur im Fernfeld der Schallquelle: Das Nahfeld eines Lautsprechers ist schwer zu bestimmen und für einige Frequenzen befindet sich der Messpunkt in 1 m Abstand wohl auch noch im Nahfeld [4], [5], [8]. Außerdem schließt der Aufbau in Bodennähe Reflexionen von dieser Begrenzungsfläche nicht aus. Am Messpunkt überlagern sich Direktschall und Reflexionen.

Anordnung 1 im Freien wurde auch mit MLSSA gemessen. Die berechneten Schalldruckpegel in den 7 Frequenzbändern sowie der unbewertete und der A-bewertete Gesamtschalldruckpegel über der Frequenz sind in Tab. 8 dargestellt:

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	dB SPL	dB(A)
r1	57,7	64,4	68,9	71,7	73,4	72,7	78,4	82,7	81,3
r2	63,2	52	56,9	61	62	61,4	65,6	72,9	69,4

Tab. 8: *in Anordnung 1 von MLSSA berechnete Schalldruckpegel in dB*

	MLSSA dB(A)	MLS mit FS18 dB(A) F	PN ungefiltert FS18 dB(A) F	Rock-Musik FS18 dB(A) F
r1	81,3	88	88	90
r2	69,4	77	78	80

Tab. 9: *Gegenüberstellung MLSSA und Schallpegelmesser FS18 in Anordnung 1*

Obwohl der Effektivwert des MLS-Signals am Lautsprecher wie bei allen anderen Signalen nach (29) auf 2,8 Volt eingestellt wurde, zeigen die Messwerte des Schallpegelmessers und die Berechnung von MLSSA deutliche Unterschiede in Tab. 9. Die große Differenz von 7 bis 8 dB zwischen der MLSSA-Ausgabe des A-bewerteten Schalldruckpegels und der Messung mit dem Schallpegelmesser ist nicht ohne weiteres zu erklären. Diese Berechnungen wurden aus der Zeitverlaufdarstellung des MLS-Rauschens berechnet wie es in Abb. 11 zu sehen ist. Auch die Berechnungen des absoluten Schalldruckpegels aus der Impulsantwort heraus brachten nicht die erwarteten Übereinstimmungen.

Eine Zusammenstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 1 im Freien ist in Tab. 10 zu finden. Schalldruckpegel in den Bewertungen A und Fast haben sich international zur objektiven Beurteilung von Lautstärken durchgesetzt, dementsprechend sind diese Ergebnisse in der Zusammenfassung aufgelistet. Ulysses berechnet lineare Schalldruckpegel nur

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

nach der Gewichtung von Tab. 2, die Ergebnisse wurden direkt aus der Ulysses-Simulation übernommen: Sie sind nicht A-bewertet. Die Tabelle ist in zwei Hälften für die Betrachtungspunkte r1 und r2 unterteilt. Abweichungen vom Messwert kleiner als 2,5 dB sind als Übereinstimmung grün markiert und unterstrichen.

	Berechnungen Gesamtpegel				Messungen dB(A) Fast	
	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS einzeln	Gesamt Lt
1 kHz	<u>91,93</u>	<u>90,6</u>	89,6	89,6	<u>93</u>	<u>93</u>
1/6 oct.PN	91,93	90,6	89,6	89,6	94	94
Pink Noise	<u>88,8</u>	<u>89,7</u>	<u>88,6</u>	<u>88,6</u>	<u>91</u>	<u>91</u>
Musik	<u>88,8</u>	<u>89,7</u>	<u>88,6</u>	<u>88,6</u>	<u>91</u>	<u>91</u>
MLS	<u>88,8</u>	<u>89,7</u>	<u>88,6</u>	<u>88,6</u>	<u>88</u>	81
1 kHz	79,89	79,2	79,2	79,2	83	83
1/6 oct.PN	79,89	79,2	79,2	79,2	83	83
Pink Noise	76,8	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>79</u>	<u>79</u>
Musik	<u>76,8</u>	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>80</u>	<u>80</u>
MLS	<u>76,8</u>	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>78,2</u>	<u>77</u>	69

Tab. 10: Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 1 im Freien. H-S steht für Hopkins-Stryker. Unterschiede < 2,5 dB sind grün markiert

In der Spalte „Berechnungen Gesamtpegel“ sind die Ergebnisse aus den Berechnungen für die 1 kHz-Oktave und aus den Berechnungen für das gesamte Spektrum der sieben IEC-Oktaven eingetragen. Die Zeilen für den

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Sinuston 1 kHz und für das schmalbandige Rauschen mit der Mittenfrequenz 1 kHz zeigen die Berechnungen für die 1 kHz-Oktave. Die anderen Zeilen beinhalten die Ergebnisse für den ganzen Audio-Frequenzbereich.

In der Spalte „Messungen dB(A) Fast“ sind die entsprechenden Messwerte aufgelistet, die mit den Schallpegelmessern ermittelt wurden. Allein die Felder für den Gesamtpegel des MLS-Rauschen beinhalten die von MLSSA berechneten Pegel, die eine deutliche Abweichung zur Messung mit dem Schallpegelmesser aufweisen.

Im Seminarraum 201 steht der Versuchsaufbau nach Abb. 5 in der Mitte des Raumes:

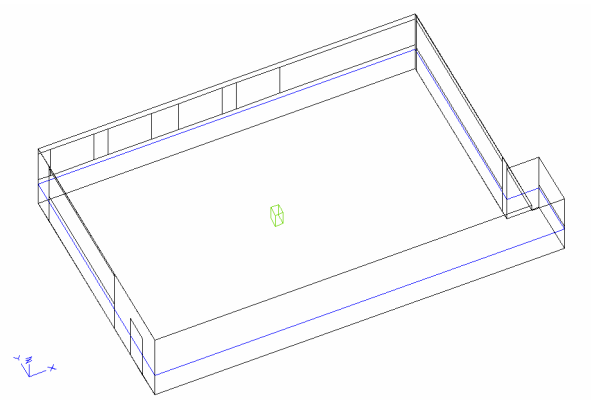


Abb. 15: Anordnung 1 im Seminarraum – der grüne Lautsprecher in der Raummitte und die blaue Hörfläche in 1,05 m Höhe

Die Berechnungen für die Anordnung im Seminarraum nach Hopkins-Stryker (18) wurden analog zu den Berechnungen in Tab. 4 und Tab. 5 durchgeführt. Die Werte für die äquivalente Absorptionsfläche werden, wie in Abschnitt 3.3 erwähnt, sowohl aus der Ulysses-Simulation wie auch aus der Berechnung mit den gemessenen Nachhallzeiten in (18) eingesetzt.

Erwartungsgemäß unterscheiden sich die frequenzabhängig berechneten Pegel durch den Einfluss der unterschiedlich ermittelten äquivalenten Absorptionsfläche nur in der unteren Oktave. Diese Abweichung ist durch den antiproportionalen Zusammenhang zwischen äquivalenter Absorptionsfläche

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

und Nachhallzeit in der Sabine'schen Formel zu erklären. In der Berechnung über den gesamten Frequenzbereich macht sich dieser Unterschied nicht bemerkbar. Die Ergebnisse sind in Tab. 11 aufgelistet.

	$\overline{S\bar{a}}$ (nach Messungen)		$\overline{S\bar{a}}$ (nach Modell)	
	r1	r2	r1	r2
Lt dB SPL	79,28	73,57	79,14	73,05
Lt dB (A)	77,37	69,90	77,41	70,07
Einzelfrequenz	83,1	74,9	83	74,7
Oktavband	83	75,2	82,9	75
Energetisch	82,9	76	82,9	75,8

Tab. 11: berechnete Schalldruckpegel für r1 und r2 nach Hopkins-Stryker (18) und (34) sowie aus den Ulysses-Simulationen für Anordnung 1 im Seminarraum

Die einzelnen Ulysses-Simulationen für die Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Absorptionsfläche beziehungsweise der Nachhallzeit zeigen ebenso keinen Unterschied im Gesamtpegel über den Frequenzen. Die Ergebnisse sind etwas höher als die unbewerteten Pegel aus der Hopkins-Stryker-Berechnung. Die frühen Raumreflexionen wurden dem Direktschall zugeordnet, dadurch steigt auch der Schalldruckpegel am Berechnungspunkt.

Die Berechnungsmethoden von Ulysses zeigen bereits hier in Tab. 11 für r2 eine gewisse Streuung, die auf die Unterschiede in den Algorithmen zurückzuführen ist, vergleiche Abschnitt 2.2.3 Simulations-Software Ulysses.

12 dB Pegeldifferenz zwischen den Punkten r1 (1m) und r2 (4m) können in einem Raum dieser Größe nicht erwartet werden. Das Diffusschallfeld überlagert das Direktschallfeld nach (17) und (25) überall, so dass das Entfernungsgesetz für den Direktschall alleine nicht angewendet werden darf.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

	r	Klark dB SPL			Klark dB(A)			FS18 dB(A)
		F	S	I	F	S	I	F
CD-Track	r	F	S	I	F	S	I	F
Sinus 1 kHz	r1	85	85	85	85	85	85	84
	r2	77	77	78	77	77	77	73
Pink Noise 1/6 oct	r1	83	83	85	83	83	84	81
	r2	75	75	77	75	75	76	77
Pink Noise ungefiltert	r1	83	83	83	80	80	81	79
	r2	76	76	76	72	72	73	73
Sprache	r1	75	75	80	70	70	75	70
	r2	69	68	70	63	64	70	63
Rock-Musik	r1	84	84	85	82	82	84	81
	r2	78	77	79	74	73	75	74

Tab. 12: Messergebnisse für Anordnung 1 im Seminarraum

Genau wie bei den Messungen im Freien ist im Seminarraum kaum ein Unterschied zwischen den Zeitbewertungen der Messungen in Tab. 12 zu erkennen. Nur beim Sprach-Sample sind deutliche Abweichungen zwischen den Bewertungsmodi FAST, SLOW einerseits und der Impulsbewertung andererseits abzulesen. Dies ist eindeutig dem mit Abstand höheren Crest-Faktor des Sprach-Samples zuzuschreiben auch wenn dieser mit einem Schallpegelmessgerät nicht in vollem Umfang (16 dB) gemessen werden kann. Im direkten Vergleich des Sprach-Samples mit dem ungefilterten Rauschen oder der Musik ist in der A-Bewertung für beide Messpunkte eine Differenz von ca. 10 dB zu sehen. Der Pegelunterschied ist durch die Linearität des Systems auch in der Analyse der verwendeten Signale nach Abschnitt 3.2 zu finden:

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Rauschen und Musik haben einen Crest-Faktor von 6 dB, das Sprach-Sample hat 16 dB Crest-Faktor. Diese Deutung des Messergebnisses widerspricht allerdings der Versuchsvorschrift, dass alle Effektivspannungen der Signale auf denselben Wert einzustellen sind. Im Idealfall wäre dann auch ein identischer effektiver Schalldruckpegel bei den unterschiedlichen Signalen zu messen gewesen, wie es bei den anderen unbewerteten Schalldruckpegeln annähernd möglich war. Selbst mit dem Echteffektivwertmesser konnte eine zuverlässige Messung der Effektivspannung vom zeitlich stark variierenden Sprachsignal nicht genau genug durchgeführt werden.

Bei den unbewerteten Pegeln fällt die Interpretation der Unterschiede zwischen Sprache, Musik und Rauschen ähnlich schwer. Es kommt hinzu, dass verstärkt tieffrequente, unhörbare Raumgeräusche die Pegelmessung beeinflussen. Unter Anwendung des A-Filters bleiben diese Geräusche außen vor und die Messung spiegelt das eigentliche Signal besser wider. Abb. 16 zeigt den Raumeinfluss auf die Messung am Punkt r2.

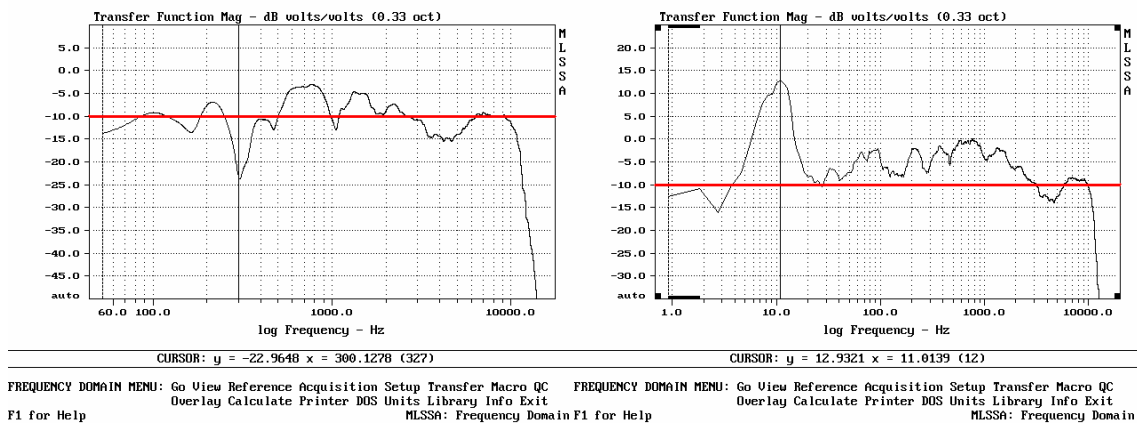


Abb. 16: Frequenzgangdarstellungen für einen Lautsprecher aus einer Impulsantwort heraus berechnet und auf Terzbänder geglättet. Links: die ersten 35 ms der Impulsantwort. Rechts: die komplette Impulsantwort, ca. 2 Sekunden

Aus der für Anordnung 1 im Abstand r2 mit MLSSA gemessenen Raumimpulsantwort sind Frequenzgänge berechnet worden. Links ist die Übertragungsfunktion dargestellt, die MLSSA aus den ersten 35 Millisekunden

der Impulsantwort ermittelt hat. Für tiefere Frequenzen als 60 Hz sind die Ergebnisse aus dieser Berechnung heraus - bedingt durch das verwendete MLSSA-Setup - nicht mehr korrekt [22]. Alle innerhalb der ersten 35 Millisekunden am Messpunkt eintreffenden Reflexionen können als frühe Reflexionen den Direktschall und damit die Ortung der Schallquelle unterstützen. Der durch spätere Reflexionen am Messpunkt hervorgerufene Raumeindruck, beziehungsweise der Nachhall, bleibt in dieser Berechnung unberücksichtigt. Zwar sind selbst durch die frühen Reflexionen deutliche destruktive Interferenzen abzulesen, aber die relative Schallverteilung um die nachträglich eingezeichnete rote Linie bei - 10 dB wirkt gleichmäßig.

Rechts in Abb. 16 sticht die hohe Resonanzspitze der Raumeigenfrequenz bei 11 Hz sofort ins Auge. Weil die Übertragungsfunktion aus der kompletten Impulsantwort berechnet wurde, bleibt die Darstellung bis zur schwarzen Markierung unterhalb von 2 Hz gültig. Viel interessanter ist aber der Bereich zwischen 60 Hz und 150 Hz: Dieser tieffrequente Teil des Frequenzgangs ist um ca. 8 dB gegenüber der linken Darstellung nach oben verschoben. Die längere Nachhallzeit macht sich in diesem Bereich bemerkbar. In den mittleren Frequenzen treten die Interferenzen nicht mehr so stark in Erscheinung und der Pegel ist nur gering höher als links im Bild: ungefähr 3 dB. Oberhalb von 3 kHz sind nur minimale Veränderungen ablesbar: Aufgrund der kurzen Nachhallzeit für hohe Frequenzen erreichen kaum noch Reflexionen in diesem Bereich das Messmikrofon.

Tab. 13 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs zwischen Berechnung und Messung für Anordnung 1 im Seminarraum. Wie bei den Ergebnissen im Freien in Tab. 10 sind Berechnungen für die 1 kHz-Oktave und für breitbandige Berechnungen aufgeführt. Von MLSSA berechnete Schalldruckpegel weisen in diesem Modellversuch wegen eines Einstellungsfehlers unbrauchbare Ergebnisse auf. Auffällig ist, dass fast nur die Messungen des Musik-Signals die breitbandig berechneten Werte in der Genauigkeit von 2,5 dB treffen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen in Tab. 10 sind es nun die Berechnungen in der 1 kHz-Oktave, die den Messwerten entsprechen.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

	Berechnungen Gesamtpegel				Messungen dB(A) Fast	
	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS einzeln	Gesamt Lt
1 kHz	80,6	<u>83,5</u>	<u>84,4</u>	<u>83,7</u>	<u>85</u>	<u>85</u>
1/6 oct.PN	<u>80,6</u>	<u>83,5</u>	<u>84,4</u>	<u>83,7</u>	<u>83</u>	<u>83</u>
Pink Noise	77,41	83	82,9	82,9	80	80
Sprache	77,41	83	82,9	82,9	70	70
Musik	77,41	<u>83</u>	<u>82,9</u>	<u>82,9</u>	<u>82</u>	<u>82</u>
MLS	77,41	83	82,9	82,9	74	xxx
1 kHz	73,66	74	<u>75,7</u>	<u>76,5</u>	<u>77</u>	<u>77</u>
1/6 oct.PN	<u>73,66</u>	<u>74</u>	<u>75,7</u>	<u>76,5</u>	<u>75</u>	<u>75</u>
Pink Noise	<u>70,07</u>	74,7	75	75,8	<u>72</u>	<u>72</u>
Sprache	70,07	74,7	75	75,8	63	63
Musik	70,07	<u>74,7</u>	<u>75</u>	<u>75,8</u>	<u>74</u>	<u>74</u>
MLS	70,07	74,7	75	75,8	65	xxx

Tab. 13: Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 1 im Seminarraum. Abweichungen < 2,5 dB sind grün markiert und unterstrichen.

Der grundsätzliche Versatz von 12 dB nach (29), (30) zwischen den Modellversuchen im Raum (Tab. 13) und im Freien (Tab. 10) ist nur grob für Position r1 in den Messungen und in den Berechnungen nach Hopkins-Stryker erkennbar. Die Ergebnisse für r2 verdeutlichen dagegen die Diffusschallüberlagerung im Raum.

3.3.2 ZWEITER MODELLVERSUCH

Nun werden zwei Lautsprecher aufgebaut wie es in Abb. 17 skizziert ist.

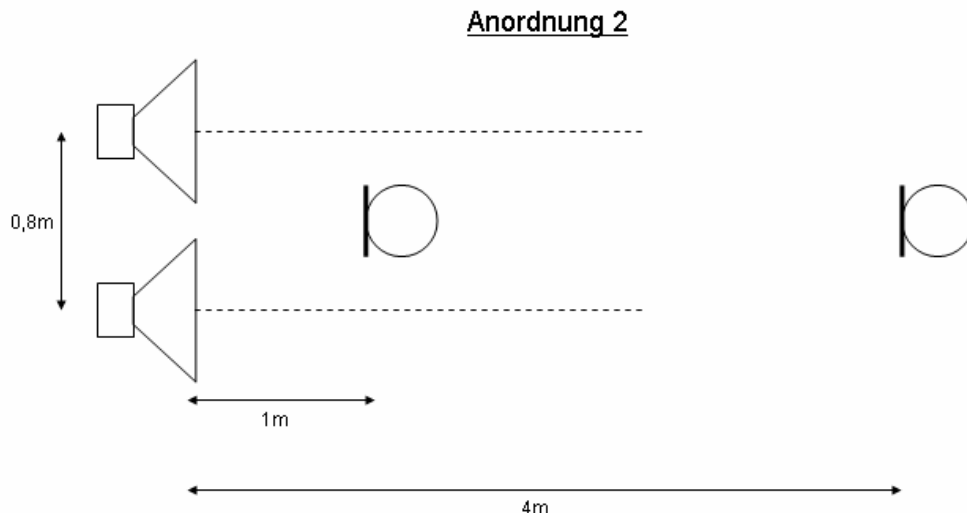


Abb. 17: Skizze zum Aufbau mit zwei Lautsprechern nach Anordnung 2

Für beide Messpunkte können die Pegel der einzelnen Lautsprecher gemessen werden, um dann den Gesamtpegel mit der mathematischen Pegelrechnung nach (15) zu berechnen. Die Ergebnisse sind weiter unten in Tab. 14 zusammengefasst.

Bei der Berechnung nach Hopkins-Stryker fällt auf, dass die betrachtete Position nicht mehr auf der Hauptabstrahlachse des Lautsprechers liegt. Der in (16) und (18) verwendete Lautsprecherparameter Q ist allerdings nur für die Hauptachse gültig (10). In dieser Anordnung wird die Änderung von Q gering ausfallen, doch sollte grundsätzlich kurz erwähnt werden, dass hier auf Polardiagramme oder sogar auf dreidimensionale Balloons aus den Datenblättern zurückgegriffen werden kann. Die daraus abgelesenen Dämpfungen in dB können über (11) in den neuen Bündelungsgrad für den betrachteten Winkel zum Lautsprecher umgerechnet werden:

$$D_{I\text{ neu}} = D_I - x \text{ dB} \quad (35)$$

Mit $x > 0$.

In Anordnung 2 betragen die Winkel nach den Winkelbeziehungen in einem rechtwinkligen Dreieck für r_1 $21,8^\circ$ und $5,7^\circ$ für r_2 . Der Directivity Index der verwendeten Lautsprecher sinkt laut Datenblatt in Anordnung 2 nur an der Position r_1 für Frequenzen oberhalb von 500 Hz um 1 dB. In sämtlichen Berechnungen nach Hopkins-Stryker sind Änderungen von Q, bedingt durch den Aufbau der Versuchsanordnungen in dieser Arbeit, berücksichtigt worden. Wie in Tab. 4 und (34) beschrieben, wurden die Pegel der einzelnen Lautsprecher am Betrachtungspunkt berechnet und anschließend mittels mathematischer Pegelrechnung addiert.

In Abb. 14 sind die Ergebnisse der Berechnungen und Messungen für Anordnung 2 im Freien dargestellt. Die Tabelle ist nun um die Spalte „mathematische Pegelrechnung“, abgekürzt „M-P“, erweitert worden. Die Basis für diese Berechnung bilden die Messwerte der einzelnen Pegel der Lautsprecher, die ebenfalls in der Tabelle unter Messungen aufgelistet sind. Sie unterscheiden sich geringfügig zu den Werten aus Anordnung 1 in Tab. 10, was der Messunsicherheit aber auch den neuen Messpositionen zuzuschreiben ist. Da Anordnung 2 einen symmetrischen Versuchsaufbau bildet, sollten die Messwerte für die einzeln erzeugten Schalldruckpegel der Lautsprecher an den jeweiligen Positionen identisch sein. Außer der Messungenauigkeit könnten sich dabei auch Herstellertoleranzen in den ermittelten Werten widerspiegeln. Die Ergebnisse für Hopkins-Stryker und Ulysses sind aus den Berechnungen für die 1 kHz-Oktave und für das gesamte Spektrum ausgewählt. Die gemessenen Gesamtschalldruckpegel bilden die Referenz für das Übereinstimmungskriterium. Mit 7 bis 8 dB lag das von MLSSA berechnete Ergebnis für den Gesamtschalldruckpegel auch in diesem Versuch wieder deutlich unter den Messwerten des Schallpegelmessers, die in Abb. 14 auch in der Zeile für das MLS-Signal eingetragen sind.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

	Berechnungen Gesamtpegel					Messungen dB(A) Fast		
	M-P dB(A)	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS 1	LS 2	Gesamt Lt
1 kHz	98	<u>93,3</u>	<u>93,9</u>	<u>93,8</u>	91,5	95	95	<u>95</u>
1/6 oct.PN	<u>97</u>	93,3	93,9	93,8	91,5	93	95	<u>98</u>
PN	<u>93</u>	90,2	92,4	92,3	90,6	89	90	<u>95</u>
Musik	94	90,2	92,4	92,3	90,6	91	91	97
MLS	<u>89</u>	<u>90,2</u>	<u>92,4</u>	<u>92,3</u>	<u>90,6</u>	85	86	<u>90</u>
1 kHz	<u>89</u>	82,9	85	85	82	87	84	<u>91</u>
1/6 oct.PN	<u>90</u>	82,9	85	85	82	87	87	<u>92</u>
PN	<u>84</u>	79,8	<u>83,7</u>	<u>83,7</u>	81	80	81	<u>86</u>
Musik	85	79,8	83,7	83,7	81	81	82	88
MLS	80	79,8	<u>83,7</u>	<u>83,7</u>	<u>81</u>	77	77	<u>83</u>

Tab. 14: Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 2 im Freien. M-P steht für mathematische Pegelrechnung. Unterschiede < 2,5 dB sind grün markiert und unterstrichen.

Aufgrund des symmetrischen Aufbaus in diesem Versuch können Laufzeitunterschiede der Schallwellen am Messmikrofon theoretisch ausgeschlossen werden. Die Überlagerung gleichfrequenter Schwingungen ohne Phasenversatz bringt bei gleicher Amplitude der Teilschwingungen den doppelten Schalldruck in der resultierenden Schwingung [1], [6]. Im Pegel bedeutet das einen Zuwachs um 6 dB gegenüber einer einzelnen Schwingung. In der Spalte der Messergebnisse in Tab. 14 ist ein grundsätzlich höherer Pegelanstieg im Gesamtpegel erkennbar als es nur durch Verdopplung der

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

abgestrahlten Energie (+ 3 dB) beim Einsatz von zwei Lautsprechern allein erklärbar wäre: Ein Indiz für die annähernd phasengleiche Überlagerung des abgestrahlten Schalls. Auch mit MLSSA berechnete Schalldruckpegel zeigen einen Zuwachs um knapp 6 dB zwischen Anordnung 1 und Anordnung 2 im Freien:

Anordnung 1 in dB(A)				Anordnung 2 in dB(A)
LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	Zwei LS
68,9	70,0	70,4	69,4	75,4

Tab. 15: Gegenüberstellung der von MLSSA für r2 berechneten Pegel im Freien

Die dichte Aufstellung der Lautsprecher in Anordnung 2 begünstigt die gegenseitige akustische Kopplung vor allem im tiefen Frequenzbereich: Die abgestrahlten Wellenlängen sind größer als der Abstand zwischen den Lautsprechern, so dass beide Quellen wie eine erscheinen und den doppelten Schalldruck erzeugen. Vor allem in der Direktschallverteilung wird dieses Phänomen auch in den graphischen Darstellungen von Ulysses erkennbar, siehe dazu Abb. 18 auf der nächsten Seite: In der Mitte der Abbildungen stehen die beiden Lautsprecher, die für tiefe Frequenzen eine gemeinsame Wellenfront bilden. Die Simulation von Anordnung 2 im Seminarraum berücksichtigt auch die frühen Reflexionen, die den eigentlichen Direktschall und damit die gegenseitige Kopplung der Quellen in größerer Entfernung merklich überlagern.

Abb. 19 zeigt das simulierte Verhältnis von Direktschall zu reflektiertem Schall im Seminarraum für Anordnung 2. Die Pegeldifferenz $L_d - L_r$ beträgt an Position r2 gerade mal 1 dB. Die Reflexionen von der direkt angestrahlten Wand beziehungsweise den Fenstern sind erwartungsgemäß recht stark.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

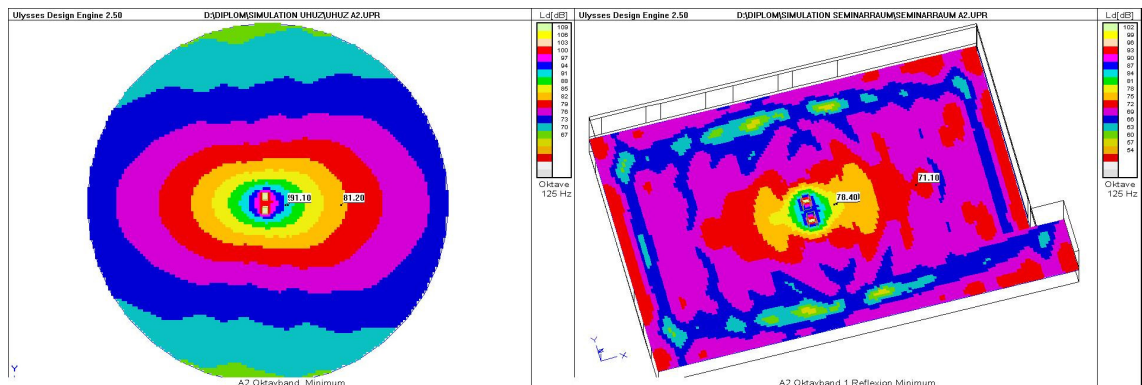


Abb. 18: *Ulysses-Simulationen von Anordnung 2 im Freien und im Seminarraum. Direktschallverteilung und Direktschallverteilung inkl. früher Reflexionen für das Oktavband bei 125 Hz*

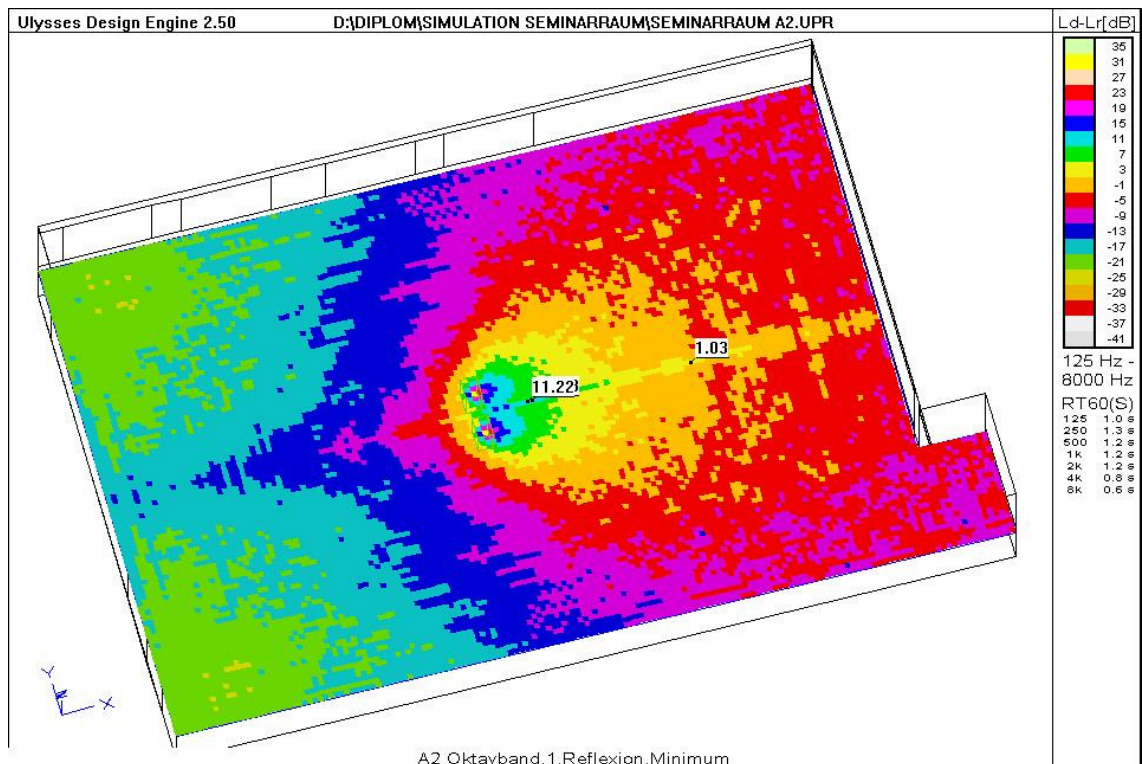


Abb. 19: *Verhältnis von Direktschall zu reflektiertem Schall in Anordnung 2*

Betrachtet man nun die Endergebnisse der Messungen für r_2 in Tab. 16, kann folgender Zusammenhang als Erklärung dienen: Verdopplung der abgestrahlten Energie durch den Einsatz zweier Lautsprecher ergibt einen Zuwachs von 3 dB.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Die Anzahl der zurückgeworfenen Reflexionen von der Wand hat sich auch verdoppelt. Am Messpunkt wirken sich also zwei Verdopplungen gleich stark aus. Im Gesamtpegel bedeutet das 6 dB mehr als bei einer Schallquelle.

	Berechnungen Gesamtpegel					Messungen dB(A) Fast		
	M-P dB(A)	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS 1	LS 2	Gesamt Lt
1 kHz	84	82,2	82,7	84,1	82	80	81	89
1/6 oct.PN	84	82,2	82,7	84,1	82	81	80	87
PN	<u>81</u>	<u>79</u>	84,2	83,5	<u>81,4</u>	78	77	<u>80</u>
Sprache	72	79	84,2	83,5	81,4	68	70	75
Musik	83	79	<u>84,2</u>	<u>83,5</u>	81,4	80	80	<u>86</u>
MLS	<u>77</u>	<u>79</u>	84,2	83,5	81,4	72	75	<u>77</u>
1 kHz	77	76,7	76,6	78,3	77,5	74	73	84
1/6 oct.PN	<u>79</u>	76,7	76,6	<u>78,3</u>	<u>77,5</u>	76	75	<u>80</u>
PN	<u>76</u>	73	<u>77,8</u>	<u>78</u>	<u>77</u>	73	72	<u>78</u>
Sprache	67	73	77,8	78	77	63	65	70
Musik	77	73	<u>77,8</u>	<u>78</u>	77	74	74	<u>80</u>
MLS	<u>69</u>	73	77,8	78	77	65	66	<u>70</u>

Tab. 16: Zusammenfassung der Ergebnisse für Anordnung 2 im Raum

Die Berechnung nach Hopkins-Stryker liefert in Tab. 16 für den zweiten Messpunkt keinen Treffer für real messbare Schalldruckpegel in der Genauigkeit bis 2,5 dB. Die Gesamtpegel für das MLS-Signal sind mit dem

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Schallpegelmesser FS18 gemessen worden.

Die Versuchsanordnungen Nr. 3 und Nr. 5 bieten kleine Veränderungen im Aufbau gegenüber Anordnung 2:

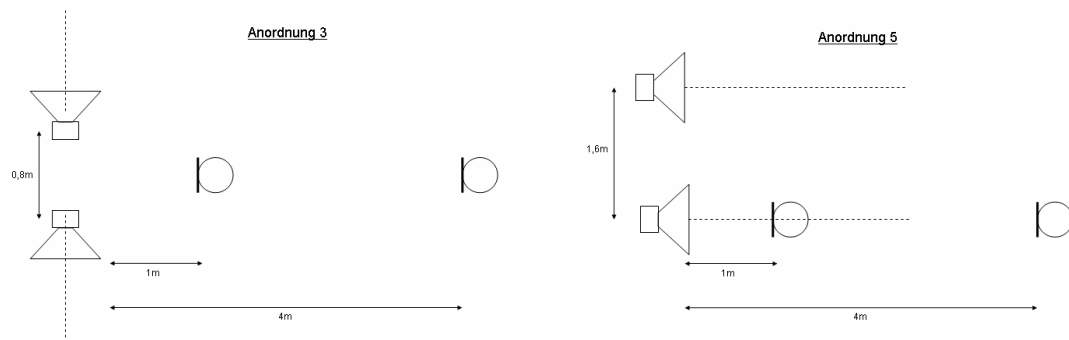


Abb. 20: Variationen des zweiten Modellversuchs: Anordnung 3 und Anordnung 5

Anordnung 3 bildet weiterhin einen symmetrischen Aufbau, allerdings befinden sich die Messpunkte nun in extremen Winkeln zur Hauptachse der Lautsprecher. Die Änderungen für Q fallen ebenso extrem aus.

Gegenüber Anordnung 2 ist der Lautsprecherabstand zueinander in Anordnung 5 auf 1,6 m verdoppelt worden. Das Messmikrofon sollte in dieser Anordnung eindeutig unterschiedliche Pegel von den Lautsprechern aufnehmen.

Nur die Ergebnisse von Anordnung 3 und Anordnung 5 aus dem Seminarraum werden als Variationen des zweiten Modellversuchs in dieser Arbeit betrachtet. Eine Darstellung der Ergebnisse aller Anordnungen würde den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen. Informationen und Ergebnisse zu den anderen Anordnungen befinden sich im Anhang.

Die Ergebnisse von Anordnung 3 sind in Tab. 17 zusammengefasst. Sie zeigen in diesem besonders dramatischen Fall deutlich wie weit Theorie und Praxis auseinander liegen können.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

	Berechnungen Gesamtpegel					Messungen dB(A) Fast		
	M-P dB(A)	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS 1	LS 2	Gesamt Lt
1 kHz	<u>77</u>	<u>76,3</u>	<u>76,9</u>	<u>77,9</u>	<u>77,9</u>	72	76	<u>77</u>
1/6 oct.PN	79	<u>76,3</u>	76,9	77,9	77,9	75	76	<u>74</u>
PN	75	72,7	79,7	78,5	78,4	71	72	69
Sprache	67	72,7	79,7	78,5	78,4	63	65	63
Musik	77	<u>72,7</u>	79,7	78,5	78,4	73	75	<u>72</u>
MLS	68	72,7	79,7	78,5	78,4	64	65	63,9
1 kHz	77	75,4	76,1	76,2	76,2	68	76	81
1/6 oct.PN	77	75,4	76,1	76,2	76,2	74	73	71
PN	73	71,7	76,2	76,3	76,3	69	70	66
Sprache	65	71,7	76,2	76,3	76,3	61	62	60
Musik	74	71,7	76,2	76,3	76,3	70	72	68
MLS	66	71,7	76,2	76,3	76,3	62	63	61,7

Tab. 17: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 3 im Raum

Die gemessenen Gesamtpegel liegen für alle abgespielten Signale außer dem Sinus sogar unter den Pegeln, die eine Quelle alleine erzeugen konnte. Dass bei Verdopplung der Energiezufuhr durch einen zweiten Lautsprecher die insgesamt als Schalldruck messbare Energie abnimmt, scheint nur durch extreme Auslöschungen an den Messpunkten erklärbar. Die Ergebnisse erinnern an die Überlagerung zweier Schwingungen mit hoher Phasendifferenz, obwohl aus dem symmetrischen Versuchsaufbau keine grundsätzlichen

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Laufzeitunterschiede abgeleitet werden können. Für das MLS-Signal sind keine Gesamtpegel mit dem Schallpegelmesser ermittelt worden. Die Ergebnisse sind aus der MLSSA-Berechnung übernommen. Die aus den kompletten Impulsantworten für beide Messpunkte berechneten Frequenzgänge in Abb. 21 zeigen keine Überraschungen:

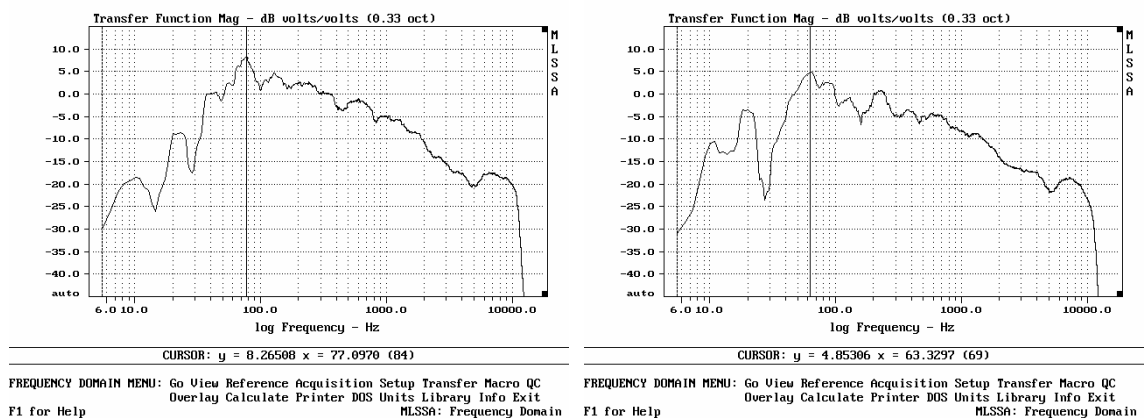


Abb. 21: *Frequenzgänge an den Messpunkten r1 (links) und r2 (rechts) in der Versuchsanordnung 3*

Links der Cursor-Markierungen in Abb. 21 sind die Raumresonanzen als Vielfache von 11 Hz erkennbar. Rechts der Cursor-Markierung fällt an beiden Messpunkten der überhöhte Tieftonbereich auf, der sich durch den Versuchsaufbau erklärt (Abb. 20): rundum abstrahlende tiefe Frequenzen und starke Schallbündelung im hohen Frequenzbereich. An beiden Messpositionen erreichen etwa gleich wenig hohe Frequenzanteile das Mikrofon.

Anordnung 5 stellt fast ein Gegenbeispiel zu Anordnung 3 dar. In Tab. 18 aufgelistete Ergebnisse aus Anordnung 5 zeigen viele Übereinstimmungen zwischen der mathematischen Pegelrechnung und den gemessenen Gesamtpegeln. Der von MLSSA berechnete Gesamtpegel in der Spalte „Messungen“ ist wieder deutlich geringer als die Schallpegel anderer breitbandiger Signale, obwohl laut Tab. 9 und der für alle Signale festgelegten

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

Effektivspannung durchaus ähnliche Pegel zu erwarten gewesen wären. Am ersten Messpunkt passen die MLSSA-Ausgabe und der aus Einzelmessungen berechnete Pegel das erste Mal knapp zusammen.

	Berechnungen Gesamtpegel					Messungen dB(A) Fast		
	M-P dB(A)	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS 1	LS 2	Gesamt Lt
1 kHz	83	81,4	78,7	81,6	81,75	78	82	89
1/6 oct.PN	<u>82</u>	<u>81,4</u>	78,7	<u>81,6</u>	<u>81,75</u>	76	81	<u>83</u>
PN	<u>80</u>	78,2	<u>79,8</u>	<u>80,6</u>	<u>81,2</u>	72	79	<u>81</u>
Sprache	<u>72</u>	78,2	79,8	80,6	81,2	62	71	<u>71</u>
Musik	<u>81</u>	78,2	79,8	<u>80,6</u>	<u>81,2</u>	72	80	<u>83</u>
MLS	<u>75</u>	78,2	79,8	80,6	81,2	64	75	<u>72,7</u>
1 kHz	<u>81</u>	76,5	75,8	76,8	77,3	80	72	<u>82</u>
1/6 oct.PN	85	76,5	75,8	76,8	77,3	81	83	81
PN	<u>75</u>	72,9	<u>76,2</u>	<u>76,5</u>	<u>76,9</u>	71	73	<u>76</u>
Sprache	<u>67</u>	72,9	76,2	76,5	76,9	62	65	<u>68</u>
Musik	<u>76</u>	72,9	<u>76,2</u>	<u>76,5</u>	<u>76,9</u>	71	75	<u>78</u>
MLS	69	72,9	76,2	76,5	76,9	64	67	65,8

Tab. 18: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 5 im Raum

Die Berechnungen nach Hopkins-Stryker liefern weder für die 1 kHz-Oktave noch für das gesamte Spektrum zuverlässige Ergebnisse, die den gemessenen

Pegeln nahe kommen. Ulysses hingegen erreicht mit den breitbandigen Berechnungen den gemessenen Pegeln entsprechende Ergebnisse.

3.3.3 DRITTER MODELLVERSUCH

Im dritten Modellversuch kommen vier Lautsprecher im Seminarraum zum Einsatz. Aus organisatorischen Gründen waren Messungen im Freien mit allen vier Lautsprechern nicht möglich.

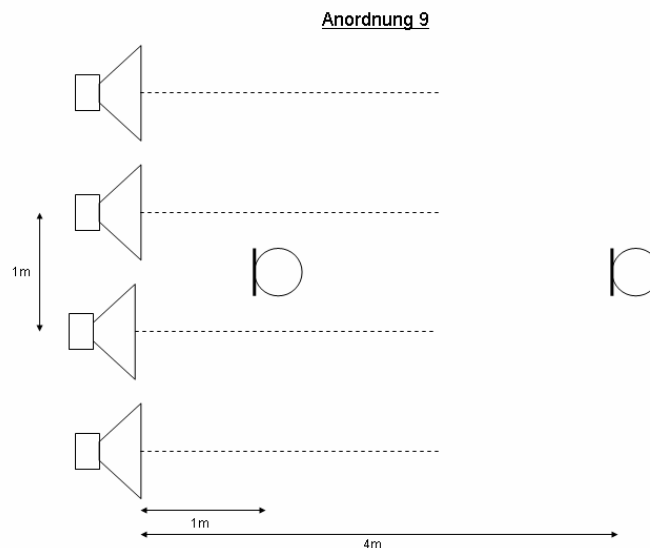


Abb. 22: Skizze zum dritten Modellversuch mit Versuchsanordnung 9

Was bei den Ergebnissen dieser Anordnung in Tab. 19 positiv auffällt, ist die Übereinstimmung des von MLSSA berechneten Gesamtpegels mit dem Ergebnis aus der mathematischen Pegelrechnung, das aus den gemessenen Einzelpegeln ermittelt wurde. Die Pegelrechnung liefert für alle anderen breitbandigen Signale ebenso Übereinstimmungen mit den jeweils gemessenen Gesamtpegeln. So kann das Ergebnis von MLSSA in dieser Anordnung auch als korrekt berechnet beziehungsweise gemessen betrachtet werden. Die Frage warum alle anderen MLSSA-Messungen in den Modellversuchen bisher keine zuverlässigen Übereinstimmungen hervorbrachten, bleibt in dieser Arbeit

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

unbeantwortet. Die Berechnungen nach Hopkins-Stryker bringen erneut keine Resultate, die mit den Gesamtpegeln aus den Messungen zusammenpassen.

	Berechnungen Gesamtpegel					Messungen dB(A) Fast				
	M-P dB(A)	H-S dB(A)	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch	LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	Gesamt Lt
1 kHz	85	82,7	<u>84,5</u>	<u>84,5</u>	82,9	69	83	81	64	<u>87</u>
1/6 oct.	85	82,7	84,5	84,5	82,9	76	81	81	76	88
PN	<u>82</u>	79,4	<u>84,4</u>	<u>84,4</u>	<u>82,6</u>	72	78	78	73	<u>84</u>
Sprache	<u>73</u>	79,4	84,4	84,4	82,6	65	68	68	65	<u>75</u>
Musik	<u>84</u>	79,4	<u>84,4</u>	<u>84,4</u>	<u>82,6</u>	74	79	80	75	<u>85</u>
MLS	<u>77</u>	79,4	84,4	84,4	82,6	64	73	73	65	<u>76,4</u>
1 kHz	77	79,5	79,9	79,9	80,3	64	74	71	69	85
1/6 oct.	<u>82</u>	<u>79,5</u>	<u>79,9</u>	<u>79,9</u>	<u>80,3</u>	76	76	77	75	<u>82</u>
PN	<u>79</u>	75,8	<u>80,7</u>	<u>80,7</u>	<u>79,9</u>	72	73	73	73	<u>79</u>
Sprache	<u>70</u>	75,8	80,7	80,7	79,9	63	63	65	63	<u>70</u>
Musik	<u>80</u>	75,8	<u>80,7</u>	<u>80,7</u>	<u>79,9</u>	74	74	75	73	<u>80</u>
MLS	<u>71</u>	75,8	80,7	80,7	79,9	64	66	66	65	<u>70,8</u>

Tab. 19: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 9

Mit vier Lautsprechern wurde auch eine MLSSA-Messung im Diffusfeld hinter den aufgebauten Lautsprechern im Seminarraum durchgeführt: Anordnung 8 entsprach dem Aufbau nach Abb. 22, nur dass die Lautsprecher direkt aneinander gestellt wurden wie bei einem Cluster. Das Messmikrofon stand

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

diagonal hinter den Lautsprechern in ca. 4 m Entfernung. Die Ergebnisse ähneln sehr den Messungen aus Anordnung 3 mit zwei Lautsprechern: Der Frequenzgang in Abb. 23 zeigt den gleichen Verlauf wie die Darstellung der Messungen für Anordnung 3 in Abb. 21. Die Impulsantwort in Abb. 23 zeigt deutlichen Diffusfeldcharakter mit vielen energiereichen Reflexionen.

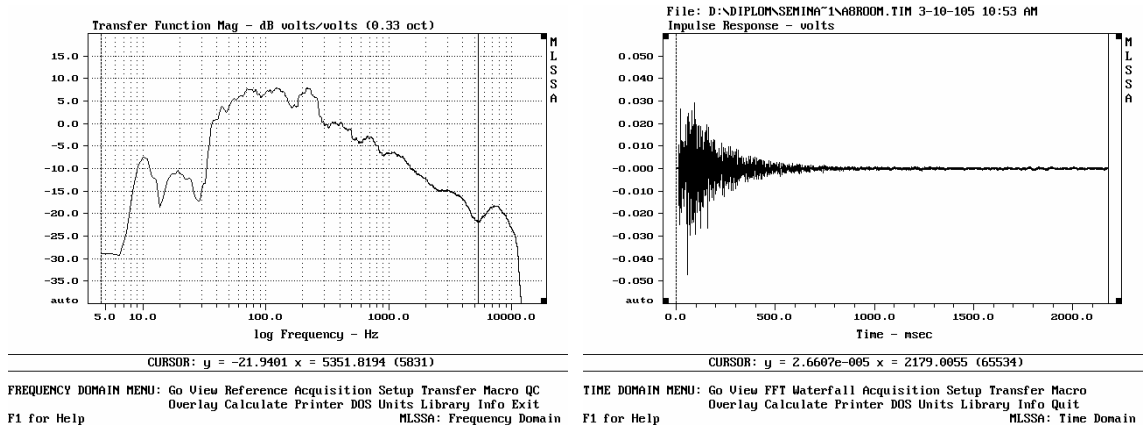


Abb. 23: Frequenzgang und Impulsantwort aller 4 Lautsprecher in Versuchsanordnung 8

Hatte MLSSA die Schalldruckpegel von zwei Lautsprechern für die Positionen r1 und r2 im Versuchsaufbau 3 zu 63,9 dB(A) und 61,7 dB(A) berechnet, so gibt der Messcomputer in Anordnung 8 bei vier Lautsprechern 63,5 dB(A) aus. Zwei Lautsprecher ergaben in dieser Anordnung 61,4 dB(A). Der Schalldruckpegel in 4 m Entfernung wurde also durch Verdopplung der Lautsprecheranzahl ebenso um den Faktor 2 (+ 3 dB) erhöht.

		r1	gerundet	r2	gerundet
Anordnung 3	2 LS	63,9 dB(A)	64 dB(A)	61,7 dB(A)	62 dB(A)
Anordnung 8	2 LS	xxx	xxx	61,4 dB(A)	61 dB(A)
	4 LS	xxx	xxx	63,5 dB(A)	64 dB(A)

Tab. 20: Schalldruckpegel im Diffusfeld des Seminarraums

3.3.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE AUS DEN MODELLVERSUCHEN

In Tab. 21 sind nun die Ergebnisse der Messungen in den einzelnen Modellversuchen einander gegenübergestellt. Die anfangs gesammelten Ideen zur Abhängigkeit des Gesamtpegels lassen sich hiermit genauer beschreiben.

	1 LS		2 LS				4 LS	
	FA1	A1	FA2	A2	A3	A5	A8	A9
1 kHz	93	85	95	89	77	89	xxx	87
1/6 oct.	94	<u>83</u>	98	<u>87</u>	74	<u>83</u>	xxx	<u>88</u>
PN	91	<u>80</u>	95	80	69	<u>81</u>	xxx	<u>84</u>
Sprache	xxx	<u>70</u>	xxx	<u>75</u>	63	<u>71</u>	xxx	<u>75</u>
Musik	91	<u>82</u>	97	<u>86</u>	72	<u>83</u>	xxx	<u>85</u>
MLS	81	xxx	90	<u>77</u>	64	<u>73</u>	xxx	<u>76</u>
1 kHz	83	<u>77</u>	91	<u>84</u>	81	82	xxx	<u>85</u>
1/6 oct.	83	75	92	80	71	81	xxx	<u>82</u>
PN	79	<u>72</u>	86	<u>78</u>	66	<u>76</u>	xxx	<u>79</u>
Sprache	xxx	<u>63</u>	xxx	<u>70</u>	60	<u>68</u>	xxx	<u>70</u>
Musik	80	<u>74</u>	88	<u>80</u>	68	<u>78</u>	xxx	<u>80</u>
MLS	69	xxx	83	<u>70</u>	62	66	64	<u>71</u>

Tab. 21: Vergleich der Messergebnisse für die Gesamtpegel in dB(A) Fast. FA1 bedeutet Anordnung 1 im Freien. Besonders hervorzuhebende Ergebnisse sind grün markiert und unterstrichen.

Allein durch die Anzahl der mit gleicher Leistung betriebenen Lautsprecher können keine Rückschlüsse auf den messbaren Gesamtschalldruckpegel erfolgen. Vielmehr ist das Verhältnis der am Betrachtungspunkt einfallenden Direktschallanteile einzelner Quellen von Relevanz. Die Anordnung der Lautsprecher und der Messposition hat also direkten Einfluss auf den messbaren Pegel.

Bei Anordnung 1 und Anordnung 5 ist in Hauptabstrahlrichtung eines Lautsprechers gemessen worden. Der Vergleich der Messungen an der Messposition r1 zeigt bei allen Signalen, außer dem Sinuston, dass der Einfluss eines zweiten Lautsprechers auf den Gesamtpegel äußerst gering ausfällt beziehungsweise unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten gar nicht festzustellen ist. Der Direktschallanteil des ersten Lautsprechers, in dessen Direktfeld gemessen wurde, überwiegt. Es ist kein wesentlicher Pegelanstieg zu vermerken, obwohl die Zahl der Lautsprecher verdoppelt wurde.

Derselbe Effekt ist im Vergleich von Anordnung 2 und Anordnung 9 zu erkennen, wobei das Pink Noise mit 80 dB(A) in Anordnung 2 als ‚Ausrutscher‘ interpretiert werden kann. Auch am Messpunkt r2 tritt bei A2 und A9 dieser Effekt auf. Diesmal fällt das schmalbandige Rauschen aus der Reihe, dafür zeigt sich die Übereinstimmung auch bei dem Sinussignal. Die äußeren Lautsprecher in der Anordnung 9 scheinen an beiden Messpunkten keinen Einfluss auf den Gesamtpegel zu haben, der im Direktfeld der beiden inneren Lautsprecher gemessen werden kann, siehe Abb. 22.

Die Zahl der Lautsprecher ist allerdings auch zwischen Anordnung 1 und Anordnung 2 verdoppelt worden. Hier steigt der Gesamtschalldruckpegel erheblich, vor allem am zweiten Messpunkt sind Pegelunterschiede von 6 dB abzulesen. In diesem Beispiel erhöht sich nicht nur die abgestrahlte Schallenergie durch den Betrieb von zwei gleich lauten Quellen. Durch den räumlich engen Aufbau der Lautsprecher nach Abb. 17 kommt es auch zur akustischen Kopplung, wie sie in Abb. 18 gut zu erkennen ist. Die Wirkung der akustischen Kopplung entspricht der durch phasengleiche Überlagerung gleichfrequenter harmonischer Schwingungen: Die Schalldruckamplitude

verdoppelt sich, damit steigt der Schalldruckpegel um 6 dB. Diese Erscheinung wird häufig mit dem Begriff Signalkohärenz bezeichnet, wobei streng genommen nur ein Sonderfall der Kohärenz eintritt: Phasengleichheit [1]. Im Seminarraum können auch die Raumreflexionen als Erklärung für den Pegelanstieg am Messpunkt r2 dienen.

Zwischen den Versuchen A5 und A9 bestehen keine Zusammenhänge, die über den Versuchsaufbau erklärt werden können. Nur die Anzahl der gleich laut betriebenen Lautsprecher ist doppelt so hoch. Die doppelte Menge abgestrahlter Energie bedeutet 3 dB mehr Schalldruckpegel am Messpunkt r1 und am Messpunkt r2, wie aus Tab. 21 hervorgeht.

Ein Pegelanstieg um 6 dB aufgrund der Vervierfachung der abgestrahlten Energie durch den Einsatz von vier statt einem Lautsprecher ist nur am zweiten Messpunkt im Vergleich von Anordnung 1 und Anordnung 9 erkennbar.

Zwei Quellen erzeugen bis 6 dB mehr Schalldruckpegel als eine Quelle alleine wenn sich die Schalldruckamplitude am Betrachtungspunkt verdoppelt, vergleiche Tab. 1. Dieser Fall tritt bei Phasengleichheit beider Schallwellen ein. Dabei spielt es keine Rolle ob dieser Sonderfall durch akustische Kopplung bei dichter Aufstellung der Quellen hervorgerufen wird, oder ob der Laufzeitunterschied bei weit voneinander entfernten Quellen exakt zu Null wird. Die Amplituden der Wellen müssen am Messpunkt gleich groß sein und in Phase schwingen.

Wird der Abstand beider Quellen zueinander im Verhältnis zur abgestrahlten Wellenlänge groß, ist die phasengleiche Überlagerung am Messpunkt allerdings schwer zu erreichen: Die Schalldruckamplitude verdoppelt sich nicht. Die Verdopplung der abgestrahlten Schallenergie bleibt gültig: daher 3 dB mehr Schalldruckpegel.

Wenn im oben genannten Sonderfall zwei Quellen 6 dB mehr Schalldruckpegel erzeugen, steht dies nicht im Widerspruch zur Verdopplung der abgestrahlten Energie beziehungsweise der Schalleistung. Die Schallintensität am Messpunkt hat sich um den Faktor 4 erhöht (6), an anderen

Punkten auf der gemeinsamen Oberfläche der von beiden Quellen dreidimensional abgestrahlten Schallwellen muss sich die Intensität aus Gründen der Energieerhaltung verringert haben (8).

In den durchgeführten Modellversuchen mit vier Quellen war keine Symmetrie in Form von gleichmäßig stark einfallendem Direktschall an der Messposition gegeben. So konnte auch nur die vierfache Energie, messbar mit 6 dB mehr Schalldruckpegel, ermittelt werden.

In einem Vorversuch waren - mit vier gleich lauten, in einem Halbkreis angeordneten Lautsprechern - im Mittelpunkt der Anordnung ca. 11 dB mehr Schalldruckpegel messbar als bei einem Lautsprecher. Die möglichen Ursachen wie starke Raumreflexionen, akustische Kopplung oder tatsächlich annähernd amplituden- und phasengleiche Überlagerung wurden im Vorversuch nicht weiter untersucht.

Doppelter Schalldruck ist nicht gleich doppelter Schalldruckpegel, wie bereits im Abschnitt 2.1.3 Grundsätzliches zu Pegeln dargestellt wurde.

Die Abhängigkeit des Gesamtpegels vom Signal selbst sollte durch die Festlegung der frequenzunabhängigen Effektivspannung in den Modellversuchen für alle Signale ausgeschlossen werden. Die unbewerteten Schalldruckpegel in Tab. 7 entsprechen dieser Versuchsvorschrift, aber die Ergebnisse in Tab. 21 lassen kaum Rückschlüsse auf die angelegten Effektivspannungen im Freien und im Seminarraum zu.

Bei Sprache und schmalbandigem Rauschen waren die Effektivwerte der Signalspannungen mit dem Echteffektivwert-Messgerät schwer zu messen, daher konnte die Verstärkung für diese Signale nur ungefähr eingestellt werden. Hohe Unterschiede zu anderen Pegelmessungen sind die Folge, vor allem beim Sprach-Sample. Die Effektivwerte des Sinus, der breitbandigen Rauschsignale und der Musik waren leichter zu messen, jedoch spiegelt sich dieser Wert kaum in den Endergebnissen wider. Die Einflüsse der Frequenzbewertung (Tab. 7) und der akustischen Situationen mit Reflexionen und Interferenzen haben die Pegel deutlich geprägt. Zudem waren die von MLSSA berechneten Pegel nur in

Anordnung 9 mit gemessenen Schalldruckpegeln vergleichbar. In den meisten Messungen verhielten sich das Rosa Rauschen und die Musik sehr ähnlich, was im nahezu identischen Crest-Faktor von 6 dB und dem breiten Spektrum beider Signale begründet ist. Dementsprechend wirkt sich auch die Frequenzbewertung auf beide Signale in ähnlichem Maße aus. Die gemessenen Werte des schmalbandigen Rauschens und des Sinus erreichen höhere Pegel, weil die Filterkurve der A-Bewertung keine Wirkung auf den Frequenzbereich um 1 kHz zeigt.

Die im Lautsprecher umgesetzte elektrische Leistung nach (7), (29) und (30) wirkt sich selbstverständlich im messbaren Pegel aus. Theoretisch waren in den Modellversuchen 12 dB Unterschied zwischen den Messungen ‚ohne Raum‘ und mit Raum zu erwarten. An den Messpunkten in 1 m Entfernung kann diese Differenz für die in Tab. 21 aufgelisteten Versuchspaare FA1/A1 und FA2/A2 durchaus festgestellt werden.

In der Spalte für Anordnung 3 in Tab. 21 kann für alle Signale, außer dem Sinus, eine Pegelabnahme von 3 dB zwischen den Messpunkten r1 und r2 abgelesen werden. Die Ähnlichkeiten der Messungen in Anordnung 3 und Anordnung 8 an verschiedenen Punkten in 4 m Entfernung sind in Abb. 21, Abb. 23 und Tab. 20 dargestellt. Die Messpunkte befinden sich im Diffusfeld der Anordnungen. Durch das Einschalten von zwei weiteren Lautsprechern in Anordnung 8 steigt der gemessene Pegel in 4 m Entfernung um knapp 3 dB, dargestellt in Tab. 20 und Tab. 21. Dies lässt auf eine gleichmäßige Erhöhung des Diffusschallpegels im Seminarraum an verschiedenen Punkten in 4 m Entfernung schließen. Allerdings wurde die flächendeckende Konstanz im Diffusschallpegel von Anordnung 3 und Anordnung 8 im gesamten Seminarraum in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Der direkte Vergleich von Berechnungen und Messungen in den Modellversuchen wurde durch die gemeinsame Grundlage der festgelegten

Effektivspannung möglich. Das Ziel der Modellversuche war es mit den Berechnungen der zu erwartenden Gesamtpegel nahe an das reale Messergebnis zu gelangen, beziehungsweise die Genauigkeit der Berechnungsmethoden aus Abschnitt 2.2 für die in der Realität nachgestellten Versuche zu überprüfen.

Dabei wurde auf möglichst genaue Berücksichtigung aller Parameter in den Berechnungen geachtet: Der Seminarraum wurde originalgetreu mit Ulysses modelliert. Die Messung der Nachhallzeit im Seminarraum mit MLSSA bestätigte die Simulation. Für die Berechnungen nach Hopkins-Stryker wurden frequenzabhängige Faktoren bestimmt, auch geringe Änderungen der Winkel in den Anordnungen wurden berücksichtigt. Für jedes Frequenzband wurde die A-Bewertung mit einbezogen.

Der gemessene Gesamtpegel wurde als Bezug für den Vergleich bestimmt. Abweichungen in der Berechnung kleiner als 2,5 dB vom Messwert wurden als Übereinstimmung interpretiert. Diese Methode für den Vergleich von Berechnung und Messung bietet sich nur für Modellversuche wie in dieser Arbeit an! In der Planungspraxis für Beschallungsanlagen stellen die berechneten Pegel die Basis für die Installation dar, deswegen dürfen Messergebnisse die berechneten Gesamtpegel nicht unterschreiten. Entsprechende Reserven nach oben können eingeplant werden, doch begrenzen auch hier vor allem finanzielle Aspekte die Möglichkeiten in der tatsächlichen Anwendung.

Die untere Grenze der für Menschen wahrnehmbaren Veränderungen im Pegel beträgt 1 dB. Ein Pegelunterschied von 3 dB ist aus technischer Sicht bereits von Bedeutung, da es sich für Energiegrößen um Faktor 2 handelt. Pegelangaben in dB werden als Endergebnisse gerundet, so ergibt sich für die maximal akzeptierte Abweichung der Berechnungen für die Modellversuche gegenüber dem real erreichten Pegel eine Differenz von 2 dB. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten erscheint das gewählte Übereinstimmungskriterium zur Beurteilung der Genauigkeit der Berechnungen annehmbar.

3 Modellversuche: Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung

In den Modellversuchen dieser Ausarbeitung wurden insgesamt 80 Gesamtpegelmessungen durchgeführt. Aufgrund der Versuche mit nur einem Lautsprecher konnte die mathematische Pegelrechnung für mehrere Quellen nur in 58 Versuchen angewandt werden. Berechnungen nach Hopkins-Stryker und mit Ulysses wurden für jeden Versuchsaufbau durchgeführt.

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen Berechnungen und Messungen in den Modellversuchen fällt ernüchternd aus, siehe Tab. 22. Der Aufwand in der Berechnung nach Hopkins-Stryker vor allem hat nicht dazu beigetragen die Gesamtpegel nach der selbst auferlegten Genauigkeit zuverlässig zu ermitteln.

Modellversuch	Math.- Pegelrech.	Hopkins- Stryker	Ulysses Einzelfreq.	Ulysses Oktavband	Ulysses Energetisch
FA1	xxx	6	7	6	6
A1	xxx	2	5	6	6
FA2	6	2	4	4	2
A2	5	2	3	4	3
A3	1	3	1	1	1
A5	9	1	3	5	5
A9	9	1	6	6	5
Summe:	30	17	29	32	28

Tab. 22: Bilanz der Übereinstimmungen zwischen Berechnungen und Messungen in den Modellversuchen

Bedenkt man nun die großen Unterschiede in den verwendeten Signalen und den starken Einfluss einer unüblichen Lautsprecheranordnung wie zum Beispiel

in der Versuchsanordnung A3, verdeutlicht sich die Anfälligkeit der Berechnungsmethoden. Werden beispielsweise nur das breitbandige Rauschen und die Musik in Lautsprecheraufstellungen betrachtet, die für die Beschallungstechnik sinnvoll sind, liegt die Trefferquote höher als in Tab. 22 dargestellt.

Wie bereits angedeutet, stellen sich in der Praxis andere Übereinstimmungskriterien zwischen Messung und Berechnung als in diesen Modellversuchen: flächendeckende Mindestpegel, Verständlichkeit und ein ausgewogenes Klangbild über den gesamten zu beschallenden Bereich werden gefordert. Im Beispiel aus [19] sollte der geforderte Mindestpegel um nicht mehr als 6 dB überschritten werden. Vor diesem Hintergrund kann behauptet werden, dass die Bilanz der Übereinstimmung in den Modellversuchen dieser Arbeit durchaus positiv ausfällt. Die Hopkins-Stryker-Gleichung kann aber höchstens zu einer groben Abschätzung empfohlen werden.

4 ZUSÄTZLICHE ERGEBNISSE AUS DEM ALLTAG VON IFBCON

4.1 SITZUNGSSAAL IM RATHAUS OFFENBACH

Für den Stadtverordneten-Sitzungssaal im Offenbacher Rathaus übernahm IFBcon die Planung der neuen Beschallungsanlage für Sprache und Musikzuspielungen wie auch die Beratung für die Mediensteuerung. Sowohl das Stadtparlament als auch externe Veranstalter nutzen den Raum.

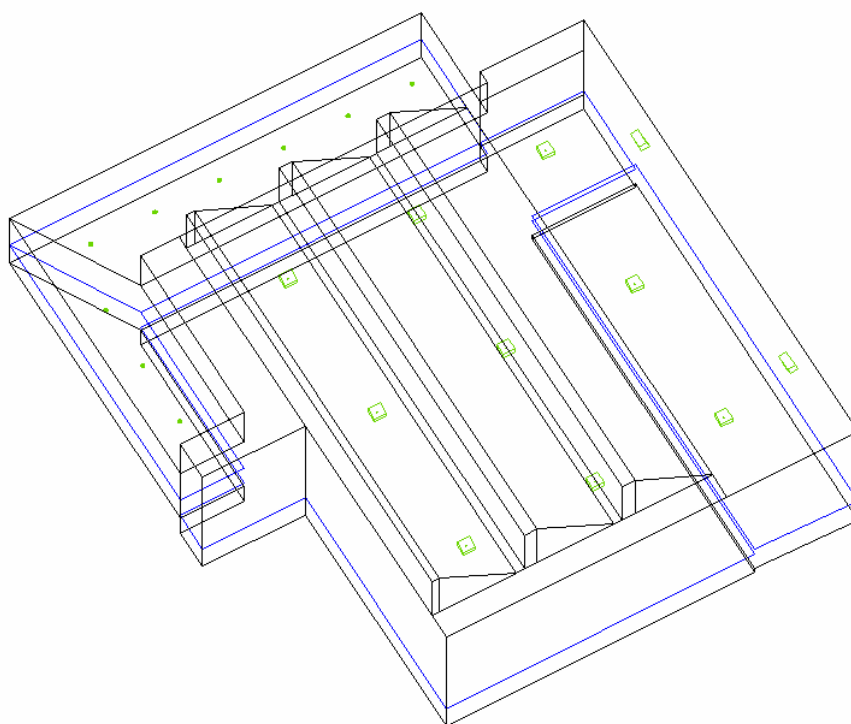


Abb. 24: Ulysses-Modell des Sitzungssaals im Offenbacher Rathaus mit jeweils neun Deckenlautsprechern für die Abgeordneten und den Publikumsbereich sowie zwei Lautsprechern zur Musikeinspielung

4 Zusätzliche Ergebnisse aus dem Alltag von IFBcon

Die Deckenlautsprecher hängen ungefähr in 5 Meter Höhe über den Abgeordneten. Die beiden Frontlautsprecher für die Musikzuspielungen sind in ähnlicher Höhe leicht schräg montiert und zielen auch auf die Sitzplätze der Abgeordneten. Die Hörfläche in der Ulysses-Simulation ist in drei Zonen unterteilt: Publikum, Podium und Sitzplätze der Kommunalpolitiker.

Die annähernd quadratisch angeordneten Deckenlautsprecher können nur in drei Gruppen zu je drei Lautsprechern in einer Reihe angesteuert werden. Nach der Installationsabnahme konnten noch Messungen für diese Diplomarbeit durchgeführt werden: Schalldruckpegel wurden im Direktfeld und im Diffusfeld der Lautsprecherreihen gemessen. Ähnlich wie in Anordnung 5 und Anordnung 9 aus den Modellversuchen in Kapitel 3, prägen die Direktschallanteile der Lautsprecher den Gesamtpegel.

Das MLS-Rauschen wurde im Direktfeld eines Lautsprechers mit dem Schallpegelmesser in Ohrhöhe zu 72 dB(A), Zeitbewertung FAST, gemessen. Als die zweite und die dritte Lautsprecherreihe hinzugeschaltet werden, bleibt der Pegel im Direktfeld der Lautsprecher fast unverändert bei 73 dB(A). Die Verdreifachung der abgestrahlten Energie ist hier nicht messbar, da zu wenig Direktschall von benachbarten Lautsprechern das Mikrophon erreicht. Die Impulsantworten im Direktfeld sehen nahezu identisch aus, obwohl die Anzahl der betriebenen Lautsprecher erhöht wurde und mehr Reflexionen eintreffen.

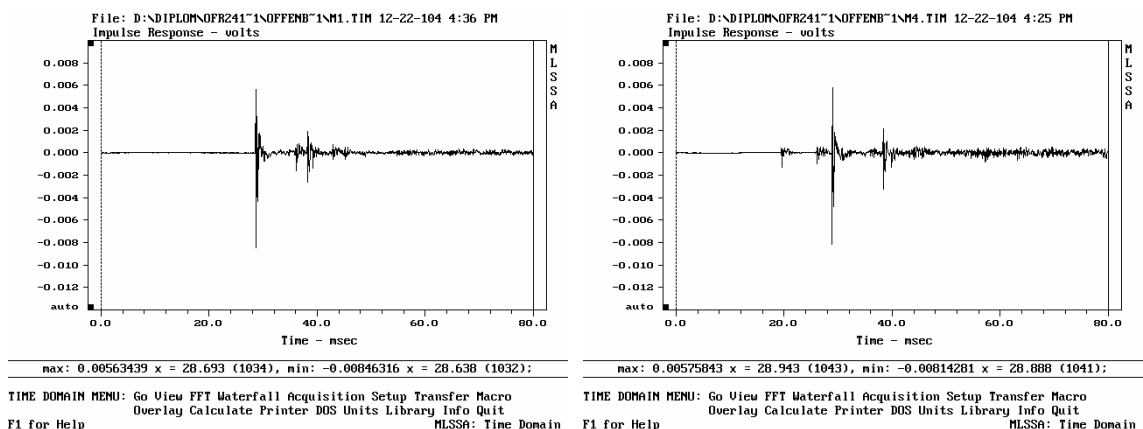


Abb. 25: Im Direktfeld eines Lautsprechers aufgenommene Impulsantworten. Links: nur eine Lautsprecherreihe. Rechts: alle drei LS-Reihen

4 Zusätzliche Ergebnisse aus dem Alltag von IFBcon

Im Diffusfeld einer Lautsprecherreihe konnten 61 dB(A) gemessen werden, alle drei Lautsprecherreihen erzeugten 68 dB(A). Faktor 3 bedeutet einen Pegelanstieg um 4,8 dB, außerdem wurde an einer anderen Position im Diffusfeld gemessen. Der Direktschallanteil ist hier ein wenig höher, was auch gut in den früher und vermehrt eintreffenden Reflexionen zu sehen ist, dargestellt in Abb. 26.

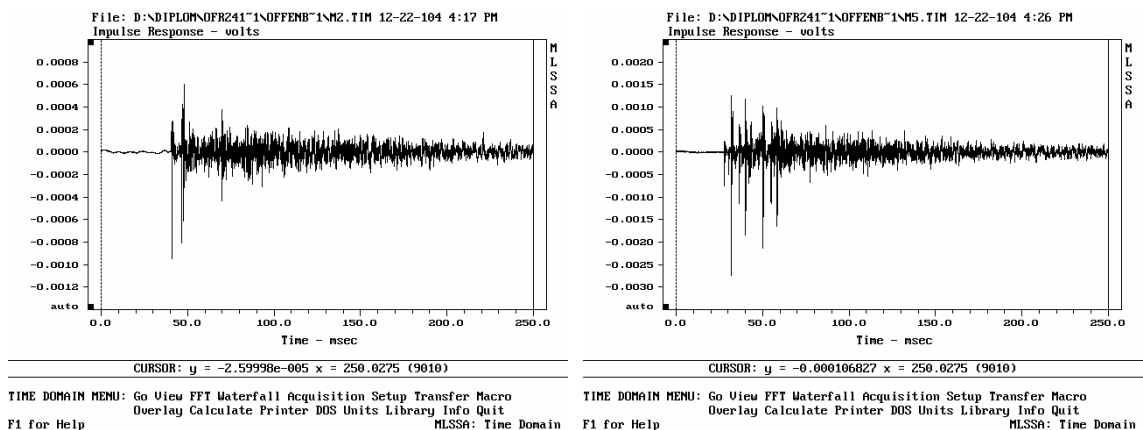


Abb. 26: Impulsantworten im Diffusfeld. Links: bei einer LS-Reihe. Rechts: alle drei LS-Reihen.

Beide Frontlautsprecher wurden in einem weiteren Versuch für einen Messpunkt in der Mitte des Raumes gleich laut eingestellt: Eine in sich symmetrische Anordnung, wie Anordnung 2 der Modellversuche, nur dass die Entfernungen hier wesentlich größer sind und dadurch die gegenseitige akustische Kopplung der Quellen ausgeschlossen ist. Das Ergebnis für den Gesamtpegel bei zwei gleich lauten Quellen konnte mit einer Pegelerhöhung um 3 dB vorausgesagt und auch gemessen werden.

4.2 GOTTLIEB-DAIMLER-STADION IN STUTTGART

IFBcon hat für das Gottlieb-Daimler-Stadion die neue Beschallungsanlage geplant: 149 Lautsprecher hängen unter dem Dach und versorgen die Tribünen und den Innenraum des Stadions mit dem gewünschten Klang.



Abb. 27: Gottlieb-Daimler-Stadion. Rot: Tribünen-LS. Blau: Innenraum-LS

In Verbindung mit Subwoofern kommen hier Hochleistungslautsprecher mit hohem Wirkungsgrad und starker Bündelung zum Einsatz, die selbst über die große Entfernung vom Dach bis zu den Sitzplätzen beziehungsweise zum Innenraum (30 bis 40 Meter) noch ausreichend hohe Schalldruckpegel liefern können.

Die Subwoofer wurden bei den Messungen nicht berücksichtigt und blieben ausgeschaltet, da sie auch im üblichen Betrieb nur als Unterstützung bei Spezialeffekten eingesetzt werden.

Für die Abnahme der Installation wurde zuerst die gleichmäßige Beschallung des Tribünenbereiches überprüft. An verschiedenen Sitzplätzen unter den Lautsprechern wurden Schallpegel gemessen, als Mess-Signal kam das MLS-Rauschen aus der MLSSA zum Einsatz: Die einzelnen Lautsprecher alleine erzeugten zwischen 85 dB(A) und 87 dB(A). Alle Lautsprecher im Tribünenbereich zusammen brachten zwischen 89 dB(A) und 90 dB(A) Schalldruckpegel an den Messpositionen. Der große Störabstand zwischen Direktschall- und Diffusschallpegel lässt kaum Einflüsse durch andere Quellen zu. Der Schalldruckpegel eines direkt benachbarten Lautsprechers alleine war an einem Sitzplatz unter dem Lautsprecher 104 nur mit 77 dB(A) zu messen. Mit beiden Lautsprechern wurde 88 dB(A) gemessen, an einem Sitzplatz unter dem direkt benachbarten Lautsprecher ergaben sich ebenso 87 dB(A) Schalldruckpegel. Sämtliche Messwerte wurden in der Zeitbewertung Fast aufgenommen.

Auf dem Spielfeld war mit allen auf den Innenraum gerichteten Lautsprechern 86 dB(A) messbar.

Diese Pegel sind längst nicht die möglichen Maximalpegel der Anlage. Ein Test für den maximalen Schalldruckpegel auf dem Spielfeld brachte bei Musikeinspielung 109 dB(A), Zeitbewertung Fast, und 113 dB(A) in der Impulswertung. Zum Testen des Maximalpegels auf den Rängen kam das Rock-Musik-Sample aus Kapitel 3 dieser Arbeit zum Einsatz. Auch bei diesem Test wurde auf einem Sitzplatz in Hauptabstrahlrichtung eines Lautsprechers gemessen, die Bass-Lautsprecher blieben ausgeschaltet.

		1 LS	2 LS	4 LS	alle LS
Pegel dB(A)	Fast	107	114	114	114
	Impulse	109	111	112	116

Tab. 23: Maximaler Schalldruckpegel bei Test-Musik an einem Sitzplatz

4 Zusätzliche Ergebnisse aus dem Alltag von IFBcon

Auch in Tab. 23 ist erkennbar, dass weiter entfernte Lautsprecher kaum Einfluss auf die messbaren Pegel in den Bewertungen A-Fast im Tribünenbereich haben. Der hohe Direktschallanteil ist hierfür verantwortlich wie es auch im Offenbacher Sitzungssaal und auch in den Modellversuchen zu sehen war.

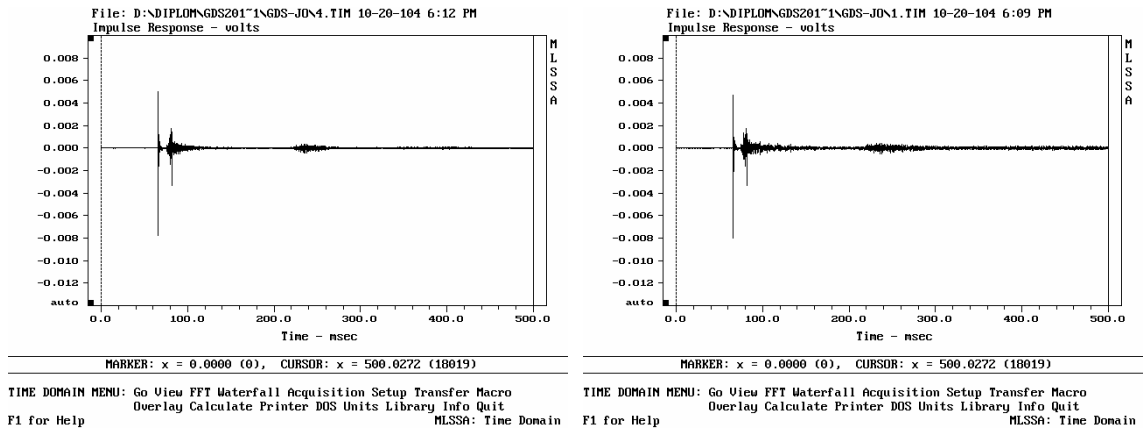


Abb. 28: Impulsantworten des Stadions. Links: ein Lautsprecher. Rechts: alle Lautsprecher. Deutlich zu erkennen: späte Reflexionen von der gegenüberliegenden Tribüne

IEC 1/1-Octave Band Acoustical Parameters

Band Parameter	3 125	4 250	5 500	6 1000	7 2000	8 4000	9 8000	500- 4000
S [dB-SPL]	--	--	--	--	--	--	--	SPL-
N [dB-SPL]	--	--	--	--	--	--	--	weighted
SNR [dB]	23.2	18.6	14.3	15.0	17.0	21.7	19.5	Averages
C50 [dB]	-0.82	-1.71	-1.32	0.56	1.22	5.76	10.03	0.509
C80 [dB]	1.17	-0.87	-0.42	1.26	1.91	6.20	10.46	1.221
D50 [%]	45.3	40.3	42.5	53.2	57.0	79.0	91.0	49.694
TS [ms]	141.6	209.5	243.9	191.4	168.7	71.6	24.3	208.409
EDT-10dB [s]	2.470	3.698	4.752	4.680	4.591	2.774	0.245	4.604
RT-20dB [s]	2.734	3.308	3.364	3.787	3.596	3.114	1.873	3.496
(-5:-25) r	-0.997	-0.998	-0.994	-0.997	-0.997	-0.999	-0.993	-0.996
RT-30dB [s]	2.935	2.814	T	T	3.240	2.954	1.662	3.146
(-5:-35) r	-0.996	-0.987	T	T	-0.992	-0.999	-0.988	-0.994
RT-USER [s]	2.917	3.247	3.015	3.511	3.340	3.022	1.867	3.191
(-10:-25) r	-0.998	-0.995	-0.994	-0.998	-0.998	-0.999	-0.993	-0.996

File: D:\DIPLOM\GDS201\1\GDS-JON\1.TIM 10-20-104 6:09 PM
JO

Abb. 29: von MLSSA berechnete akustische Parameter. Rot markiert: Nachhallzeiten im Stadion ohne Subwoofer gemessen.

4.3 HORNBERGTUNNEL IM SCHWARZWALD

Die neue Ortsumgehung für das Städtchen Hornberg im Schwarzwald führt die B 33 durch einen 1870 Meter langen Tunnel. Das Ingenieurbüro IFBcon war mit einer gutachterlichen Stellungnahme zur Machbarkeit der geplanten Beschallungsanlage im Hornbergtunnel beauftragt. Die Beschallungsanlage soll als elektroakustisches Notfallwarnsystem genutzt werden.

Zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften des bereits fertig gebauten Tunnels wurde dieser mit einem stark bündelnden Hornlautsprecher und mit einem kugelförmig abstrahlenden Lautsprecher (Dodekaeder) akustisch angeregt und mit MLSSA und einem Schallpegelmesser gemessen.

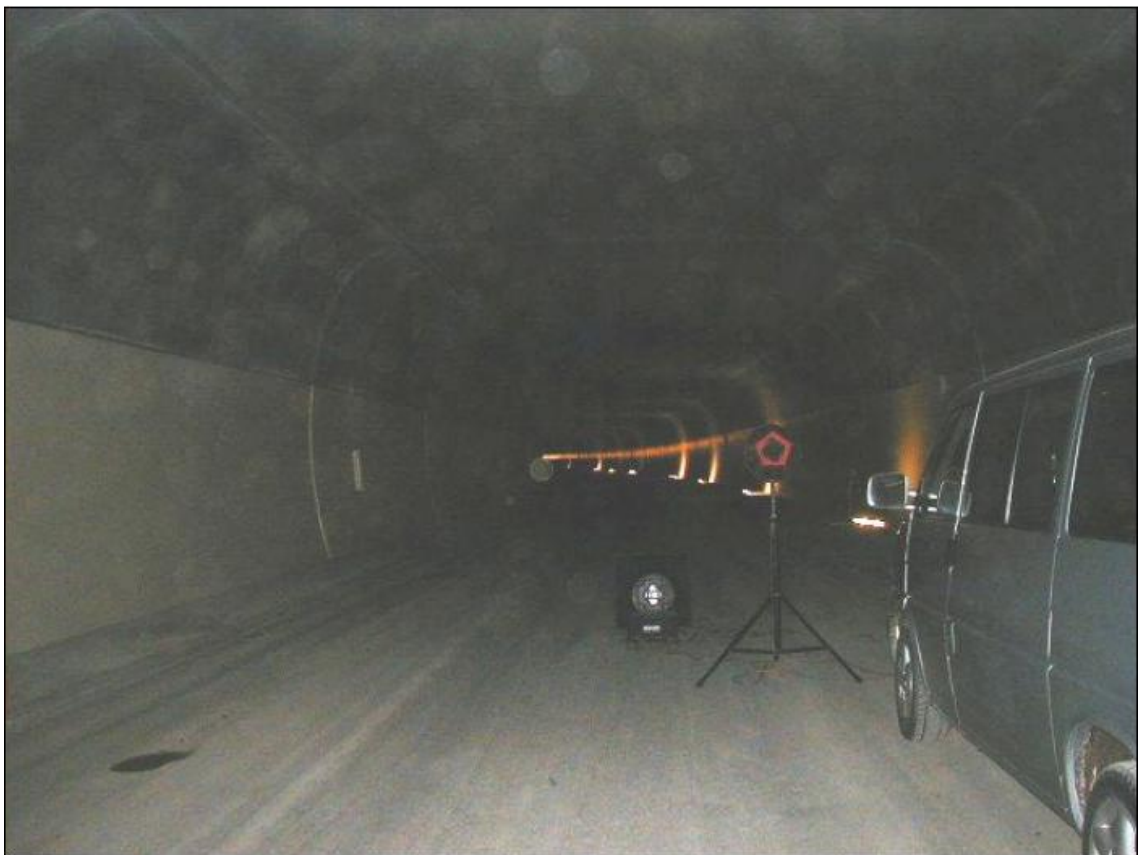


Abb. 30: Hornlautsprecher auf dem Boden und der Kugellautsprecher auf einem Stativ im leeren Hornbergtunnel

Die Messpunkte lagen in unterschiedlichen Entfernungen rechts, in der Mitte und links auf der Fahrbahn.

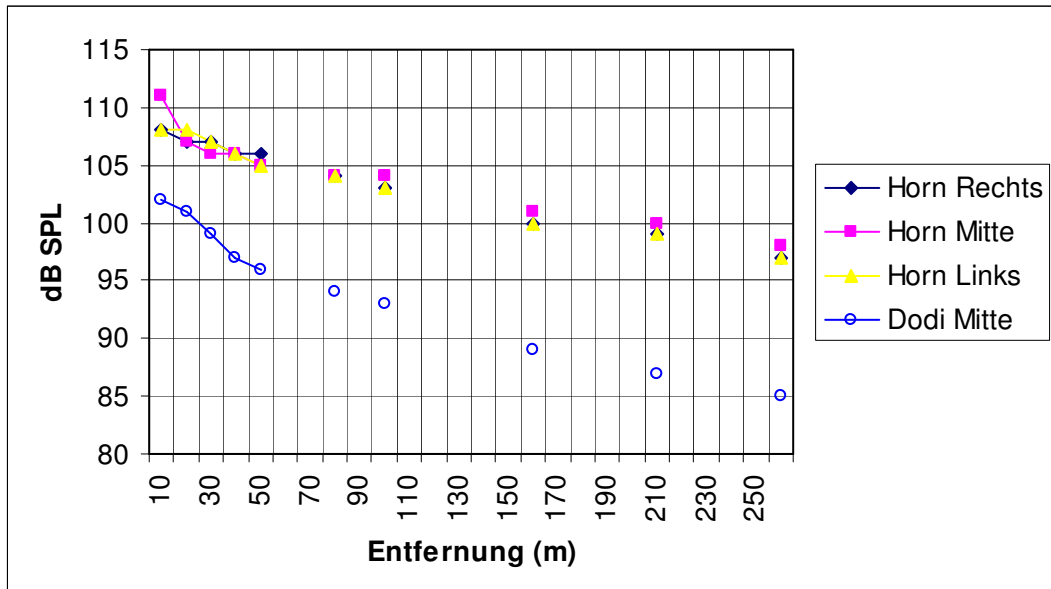


Abb. 31: *gemessene Schalldruckpegel im Tunnelabschnitt mit gerader Decke*

In Abb. 31 ist die Plateaubildung zwischen 50 und 100 Meter Entfernung für den Hornlautsprecher hervorzuheben. In diesem Abschnitt fallen die starken Reflexionen von den schallharten Tunnelwänden und der gerichtete Direktschall zusammen. Auch für die Messungen mit dem Dodekaeder ist dieser Effekt erkennbar, wenn auch auf niedrigerem Niveau und nicht so ausgeprägt wie beim Hornlautsprecher. Ab 100 Meter Entfernung fällt der Pegel mit annähernd 6 dB pro Entfernungsverdopplung, das scheint dem Freifeldverhalten zu entsprechen.

Denkt man an die grafischen Darstellungen zum Hallradius oder an die Modifikationen der Hopkins-Stryker-Gleichung in der Fachliteratur [3], [4], könnte der Bereich zwischen 50 und 100 Metern Entfernung auch als Bereich um den Hallradius interpretiert werden. Der Verlauf in größerer Entfernung ähnelt dem Verlauf der modifizierten Hopkins-Stryker-Darstellungen [3].

Die Nachhallmessung mit MLSSA bringt ebenso ungewöhnliche Ergebnisse wenn man einen Tunnel als ‚normalen‘ Raum betrachtet.

4 Zusätzliche Ergebnisse aus dem Alltag von IFBcon

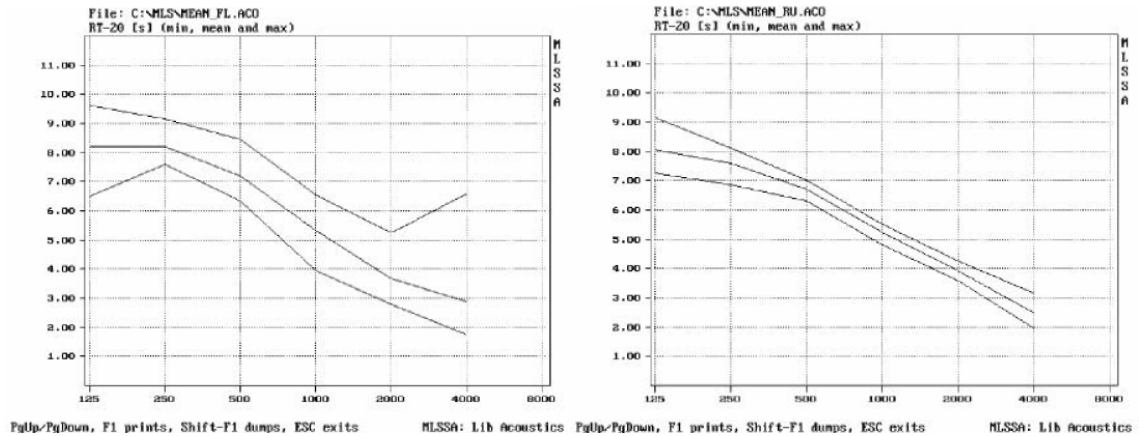


Abb. 32: mit MLSSA gemessene Nachhallzeiten im Tunnel über alle Messpunkte gemittelt. Links im flachen Tunnelabschnitt. Rechts bei gewölbter Decke.

Extrem hohe Nachhallzeiten konnten im Tunnel ermittelt werden, sowohl bei flacher Decke als auch im gewölbten Bereich. Die schallharten Wände tragen vor allem im hohen Frequenzbereich dazu bei, die Schallenergie länger im Tunnelraum zu halten. Stehende Wellen bilden sich in der Röhre zwischen allen parallelen Begrenzungsflächen.

IFBcon empfiehlt hier stark richtende Hornlautsprecher mit einem Übertragungsbereich von 350 Hz bis 8 kHz, die an der Decke über der Fahrbahnmitte im Abstand von 45 Metern montiert werden. Die Hauptabstrahlachse zielt in 36 Meter Entfernung auf den Boden und es müssen dort noch 100 dB(A) Schalldruckpegel erzielbar sein. Neben ausreichendem Schalldruckpegel ist für ein Notfallwarnsystem die Sprachverständlichkeit oberstes Ziel, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

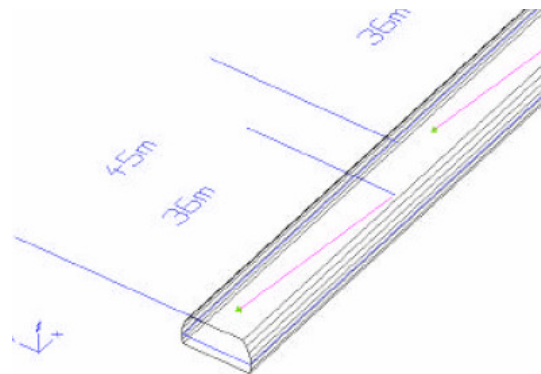


Abb. 33: Empfehlung zur Lautsprecherausrichtung im Hornbergtunnel

5 ZUSAMMENFASSUNG

5.1 WICHTIGE FAKTOREN BEI DER BERECHNUNG UND MESSUNG VON GESAMTSCHALLDRUCKPEGELN

In einer gedachten Kette aus Signal, Mischpult, Verstärker und Lautsprecher können schon mit dem theoretischen Teil dieser Arbeit Faktoren für die Abhängigkeiten bei den Gesamt- und Maximalschallpegel bestimmt werden: Signal-Crest-Faktor, Aussteuerung, Verstärkungsfaktor für die Signalspannung, Dauerbelastbarkeit des Lautsprechers und dessen Wirkungsgrad stellen die wichtigen Punkte dar. In einem kurzen Beispiel sollen die Zusammenhänge erläutert werden:

Ein Signal mit dem Crest-Faktor 6 dB wird an einem Mischpultausgang voll ausgesteuert. Die Aussteuerungsgrenze ist oft mit 0 dB beschriftet, wie es auch in der Signalanalyse in Kapitel 3.2 der Fall war. Dahinter verbirgt sich der Bezug für die Signalamplitude entweder in Quantisierungsstufen oder in Spannungen beziehungsweise Spannungspegeln, wie zum Beispiel 6 dBu (1,55 Volt effektiv). Bei Vollaussteuerung ist das der Wert, den die Spitzen im Signal erreichen, der Effektivwert des Signals liegt dem Crest-Faktor entsprechend darunter, in diesem Beispiel 6 dB.

Das ausgesteuerte Signal wird einem Verstärker zugeführt. Der maximale Verstärkungsfaktor oder die maximale Spannungsverstärkung sind eine viel interessantere Information über den ‚idealen‘ Verstärker als die Angabe einer Leistung an einer bestimmten Last. Die zugeführte Signalspannung wird durch einen einstellbaren Faktor auf einen Wert verstärkt, der als Ausgangsspannung in Verbindung mit der Lautsprecherimpedanz nach (7) der

Dauerbelastungsgrenze des angeschlossenen Lautsprechers angepasst werden kann. Wenn die umgesetzte Leistung nach (7) die Belastungsgrenze gerade noch nicht erreicht, ist ein Schalldruckpegel messbar, der als maximaler Schalldruckpegel interpretiert werden sollte, da der Lautsprecher im Grenzbereich seiner Zuverlässigkeit arbeitet. Maximale Schalldruckpegel auf die mechanischen Grenzen des Lautsprechersystems zu beziehen und als kurzzeitig messbare Pegel auszuweisen, bringt dem Anwender und Planer nicht die nötigen Informationen, wie sich der Lautsprecher im andauernden Betrieb verhält.

Die Belastungsgrenze des in den Modellversuchen dieser Arbeit verwendeten Lautsprechers JBL Control 29 AV liegt nach der AES-Empfehlung [23] bei 150 Watt, die Nennimpedanz beträgt 8 Ohm. Aus (7) ergibt sich hiermit eine Effektivspannung von 34,64 Volt. Bei Vollaussteuerung auf 6 dBu am Mischpultausgang liegt der Effektivwert des Signals in diesem Beispiel bei 0,775 Volt, 6dB niedriger als der Spitzenwert. Die erforderliche Spannungsverstärkung, um den Lautsprecher in höchstem Maße auszulasten, liegt bei Faktor 45 oder 33 dB. Signale mit höherem Crest-Faktor können bei Vollaussteuerung und einer Spannungsverstärkung wie in diesem Beispiel die Belastungsgrenze des Lautsprechers nicht erreichen, damit ist der maximal messbare Pegel niedriger als im Beispiel.

Mit einem höheren Wirkungsgrad wäre bei gleicher Belastbarkeit nach (2) auch mehr Schalldruck messbar.

Fazit: Nachdem festgelegt ist zu welchem Zweck eine Beschallungsanlage eingesetzt werden soll (Welche Signale? Welcher Ort? Größe des Publikums? Erforderlicher Schalldruckpegel?), kann bereits nach diesem theoretischen Beispiel die Art und die Menge der benötigten Ausrüstung abgeschätzt werden.

In den Modellversuchen und bei den Terminen mit dem Ingenieurbüro IFBcon haben sich weitere relevante Punkte für den Gesamtpegel und die Pegeladdition einzelner Quellen herausgestellt: Bei mehreren Quellen ist das Verhältnis der am Messpunkt einfallenden Direktschallwellen wichtig, das in

erster Linie durch die Anordnung und die Ausrichtung der Lautsprecher bestimmt wird. Der Gesamtpegel hängt davon ab wie groß die Pegelunterschiede zwischen den einzelnen Wellen sind und zu welcher Zeit der Direktschall der einzelnen Quellen an der Messposition eintrifft. Überlagern sich mehrere Wellen sollte bedacht werden, ob durch phasengleiche Überlagerung, akustische Kopplung oder destruktive Interferenz besondere Effekte erwartet werden können, wie sie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben sind.

Der Einfluss durch Zeit- und Frequenzbewertungen auf die Pegelausgabe darf beim Vergleich von Messergebnissen nicht vergessen werden. Der Pegel eines Signals mit breitem Spektrum sinkt beispielsweise nach der A-Bewertung im Gegensatz zur unbewerteten Pegelausgabe aufgrund der starken Dämpfung tiefer Frequenzen. Die Zeitbewertungen des Pegels sind interessant, wenn ein Signal mit unbekanntem Crest-Faktor gemessen wird. Es darf jedoch nicht erwartet werden, dass die Impuls-Bewertung den Schalldruckpegel einer Signalspitze wiedergibt.

Um MLSSA als zuverlässigen Schallpegelmessgerät einzusetzen, bedarf es einer tiefer gehenden Einarbeitung als es im Rahmen dieser Arbeit möglich war. Die Ergebnisse für die Schalldruckpegel in den Modellversuchen wichen zu sehr von den Pegeln anderer Schallpegelmessgerät ab. Die Messung und Berechnung von Impulsantworten jedoch und den daraus abgeleiteten Frequenzgängen oder Nachhallzeiten erklärten sich schnell und eröffneten die vielseitigen Möglichkeiten dieses Messinstrumentes.

Die Modellversuche haben gezeigt, dass es mit den vorgestellten Verfahren zur Berechnung von Gesamtpegeln möglich ist, Werte zu berechnen, die auch in der Realität nachgemessen werden können. In Versuchsanordnungen, die in der Beschallungstechnik eher außergewöhnlich sind, liegen die Berechnungen der Modellversuche zwar weit neben dem realen Messergebnis, aber bei ‚sinnvollen‘ Versuchen waren genaue Übereinstimmungen zu erreichen.

5.2 SCHLUSSWORT

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl. Phys. Ing. Volker Löwer und allen Mitarbeitern des Planungsbüros IFBcon in Bischofsheim. Sie haben mich jederzeit in einem freundschaftlichen Verhältnis mit Rat und Tat, Ideen und kritischen Fragen unterstützt und gefordert. Das in mich gesetzte Vertrauen und die zur Verfügung gestellte Ausrüstung trugen den wesentlichen Teil zur praktischen Durchführung meiner Arbeit bei.

Selbstverständlich geht mein Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Christof Ricken von der Fachhochschule Wiesbaden, Fachbereich 03 Informationstechnologie und Elektrotechnik, für die Betreuung dieser Arbeit in Kooperation mit dem Ingenieurbüro IFBcon. Ein freundliches Dankeschön gilt auch allen anderen Mitarbeitern des Fachbereichs, die mir während der vorlesungsfreien Zeit freie Hand in der Nutzung des Seminarraums 201 ließen und so die Modellversuche in diesem Raum möglich machten.

Ich danke meiner Familie, meinen Freunden und Bekannten, die alle zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben – jeder auf seine Art und Weise.

Jörg Orendi

Mainz, am 25. Mai 2005

6 ANHANG

6.1 SOFTWARE ZUM THEMA BERECHNUNG, MESSUNG UND SIMULATION

Eine Auflistung erhältlicher Software aus dem Bereich Berechnung, Messung, Simulation von Raumakustik, Elektroakustik, Beschallungstechnik ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

Ulysses 2.71, IFB Consulting

www.ifbcon.de

Ease 4.1, ADA Acoustic Design Ahnert

www.ada-acousticdesign.de

Monkey Forest, AAC Audio & Acoustics Consulting

www.anselmgoertz.de

Dirac 3.1 und Sabin 3.0 , Acoustics Engineering

www.acoustics-engineering.com

MLSSA 10WA, DRA Laboratories

www.mlssa.com, Vertrieb in Deutschland www.harmonic-design.com

(für Messungen ist auch Hardware nötig: MLSSA-Hardware als PCI-Steckkarte)

6.2 ULYSSES SYSTEMVORAUSSETZUNGEN

<u>Detail</u>	mindestens benötigt	empfohlen
Prozessor :	80486DX	Pentium MMX, K6...
Taktfrequenz :	----	je schneller, desto besser... (> 166 Mhz für Echtzeitalisation)
Betriebssystem :	Windows 95	Windows 95/98/NT
RAM (Win 95) :	16 MBytes	>= 32 MBytes
Grafikkarte, Auflösung :	640 x 480 pixel	>= 800 x 600 pixel
Grafikkarte, Farben :	256 Farben	>= 65536 Farben (HiColor)
Grafik-Eingabemedium :	Maus/Trackball/Digitizer	
Soundkarte :	16 Bit, 44.1 kHz (nur für Auralisation notwendig)	

ANMERKUNG :

Sie müssen nicht unbedingt die jeweils neueste Prozessorgeneration mit der jeweils aktuell höchsten Taktfrequenz besitzen, um mit ULYSSES in akzeptabler Zeit Ihre Ergebnisse zu berechnen.

Sie brauchen auch nicht unbedingt 64 MB RAM in Ihrem Computer, um mal eben die Verhältnisse in einem quaderförmigen Raum (6 Flächen) mit 2 Lautsprechern zu berechnen...

Es kann aber hilfreich sein, Berechnungsfunktionen für einen Raum, der aus 8357 Flächen modelliert wurde und der mit einem Deckensystem von 283 Lautsprechern beschallt werden soll, auf einem etwas schnelleren Rechner (200++ Mhz, 32 MB RAM etc..) durchzuführen, weil dadurch ihre Nerven, Ihre Gesundheit und evtl. auch Ihr Geldbeutel (Kaffee- und Zigarettenverbrauch..) geschont werden...

6.3 NACHHALLZEIT NACH W. C. SABINE

Die Formel zur Berechnung der Nachhallzeit (engl.: reverberation time) nach Wallace Clement Sabine (1868-1919) lautet:

$$RT_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i}$$

V: Raumvolumen

S: Teilfläche der Raumbegrenzung

α : Absorptionskoeffizient einer Teilfläche

$S \cdot \alpha$: äquivalente Absorptionsfläche

In der Literatur ist auch häufig der Faktor 0,163 zu finden. Dieser ergibt sich,

6.5 VON ULYSSES BERECHNETE ABSORPTIONSFLÄCHE IM SEMINARRAUM 201

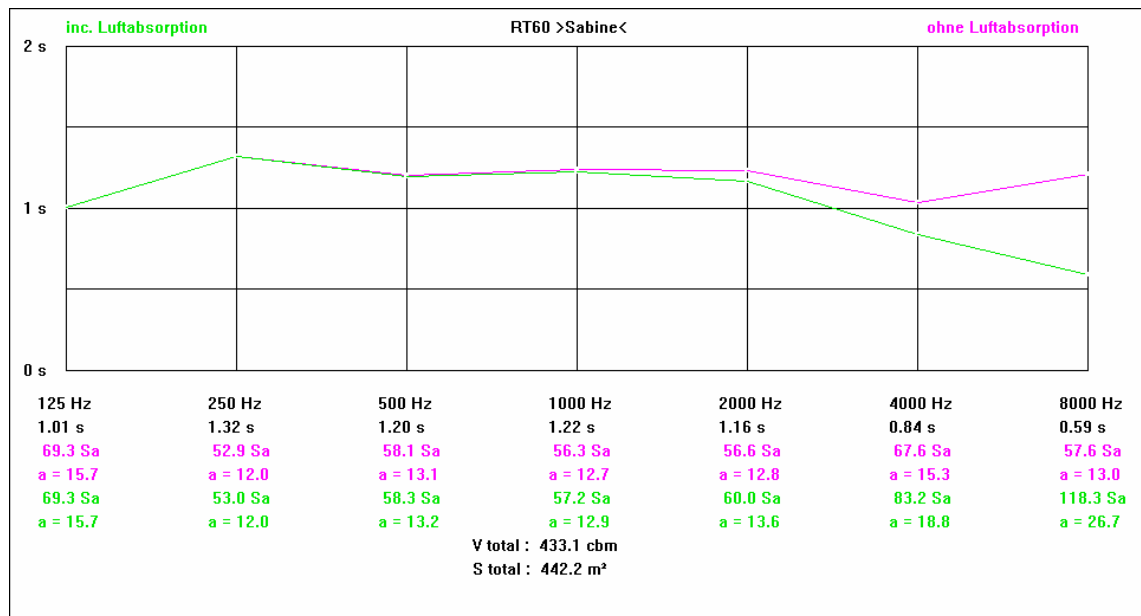


Abb. 34: äquivalente Absorptionsfläche „Sa“ und Nachhallzeiten berechnet aus der Ulysses-Raumsimulation

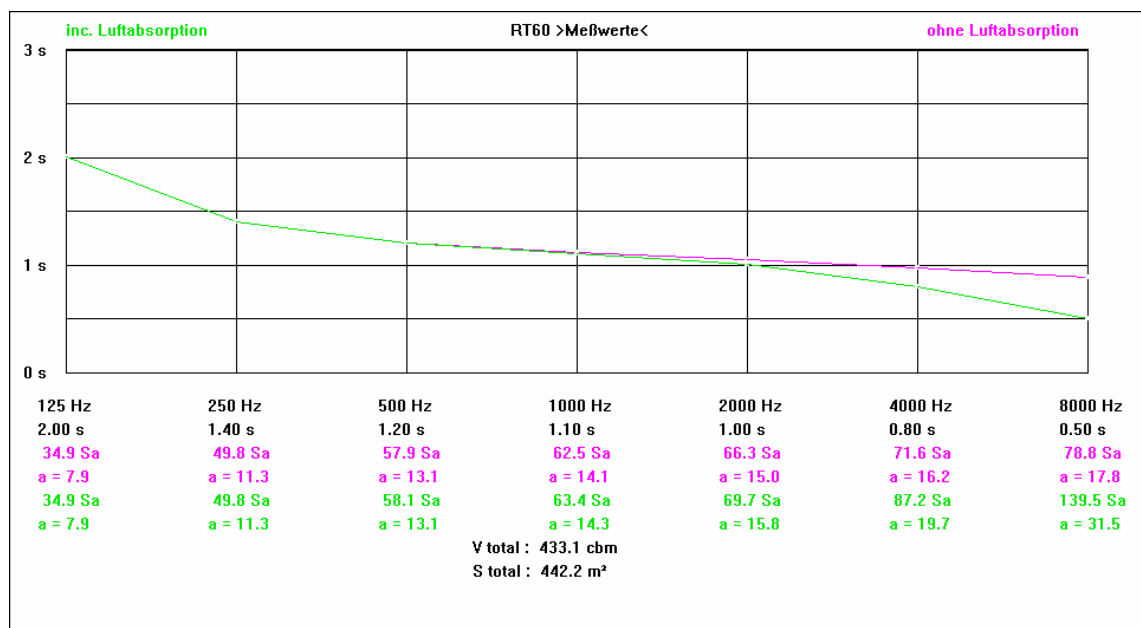


Abb. 35: äquivalente Absorptionsfläche „Sa“ berechnet aus den eingegebenen Messwerten für die Nachhallzeit

6.6 EIGENFREQUENZEN DES SEMINARRAUMS

In einem so genannten Rechteckraum bilden sich stehende Wellen, Raumresonanzen. Über die Raumabmessungen und die Schallgeschwindigkeit lassen sich die Eigenfrequenzen berechnen [4]:

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

c: Schallgeschwindigkeit

n: Ordnungszahl der Eigenschwingung (0,1,2,...)

l: Raumabmessungen

Mit den Raummaßen aus (23) lassen sich die Eigenfrequenzen des Seminarraums, als Rechteckraum betrachtet, berechnen.

n_x, n_y, n_z	0,0,1	0,1,0	0,1,1	1,0,0	1,0,1	1,1,0	1,1,1
f [Hz]	56,7	17,53	59,31	11,61	57,84	21,02	60,44

Tab. 25: einige Raumresonanzen für den als Rechteckraum betrachteten Seminarraum 201 an der Fachhochschule mit $c = 340$ m/s

6.7 ANALYSEN DER TESTSIGNALLE AUS COOL EDIT

Testsignal 1: Sinus 1 kHz, 3 dB Crest-Faktor

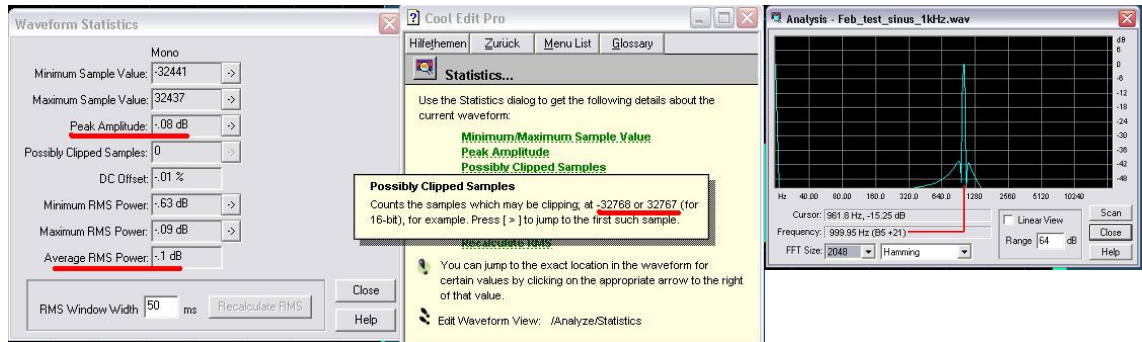


Abb. 36: Analyse für den Sinus aus Cool Edit (Aussteuerung, Crest-Faktor, Spektrum)

Testsignal 2: schmalbandiges Rosa Rauschen, Bandbreite 1/6 Oktave, Mittenfrequenz 1 kHz, 6 dB Crest-Faktor

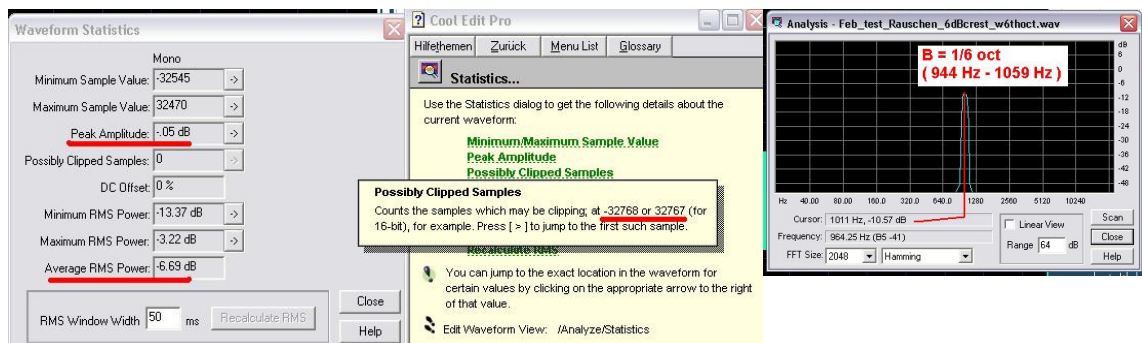


Abb. 37: Analyse des 1/6 oct. PN

Testsignal 3: breitbandiges Rosa Rauschen, 6 dB Crest-Faktor

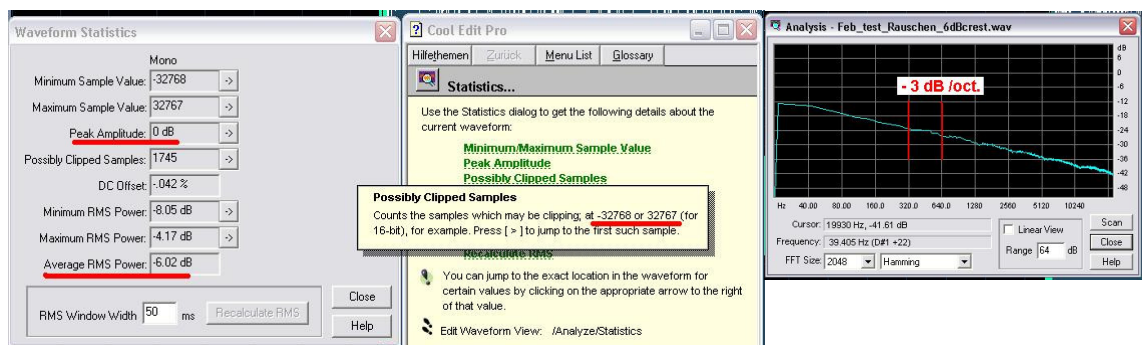


Abb. 38: Analyse des breitbandigen PN

Testsignal 4: Sprache, 16 dB Crest-Faktor

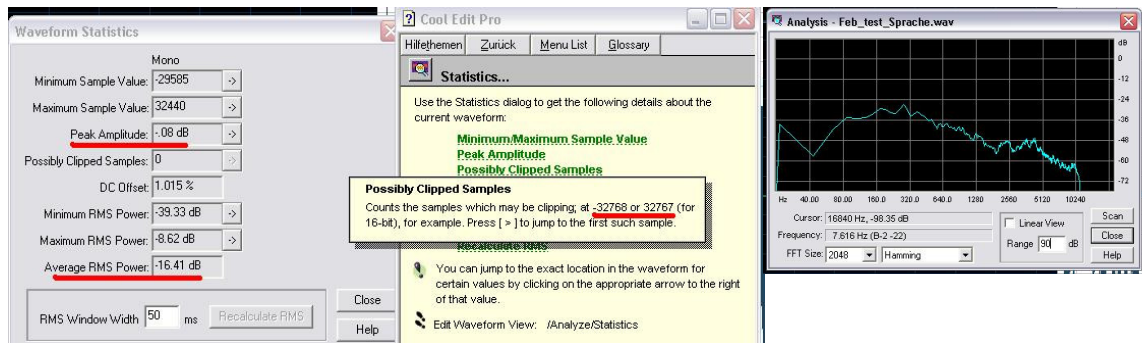


Abb. 39: Analyse des Sprach-Samples

Testsignal 5: Rock-Musik, 6 dB Crest-Faktor

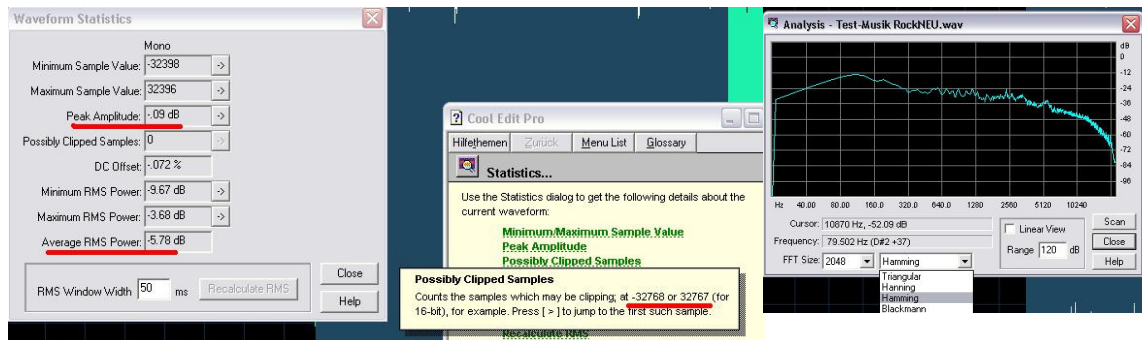


Abb. 40: Analyse der Rock-Musik

Das Musik-Sample ist ausgeschnitten aus dem Song: „The Speed Of Darkness“ vom Album „Crowned Unholy“ der Band „The Crown“, veröffentlicht über Metal Blade Records Inc. im Jahr 2004.

6.8 SKIZZEN ZU DEN MODELLVERSUCHEN

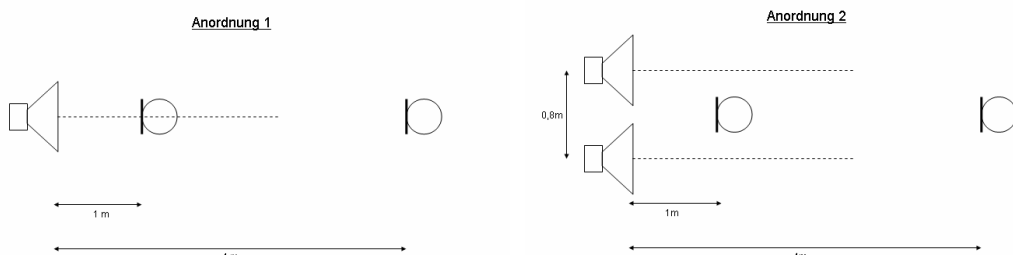


Abb. 41: Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon

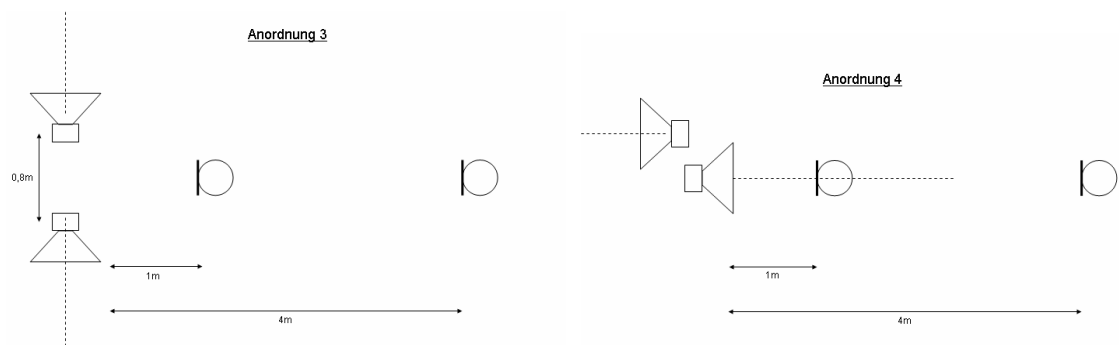


Abb. 42: Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon

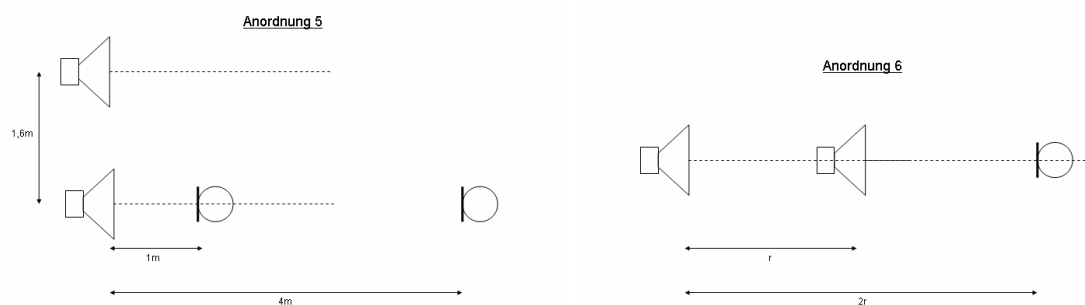


Abb. 43: Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon

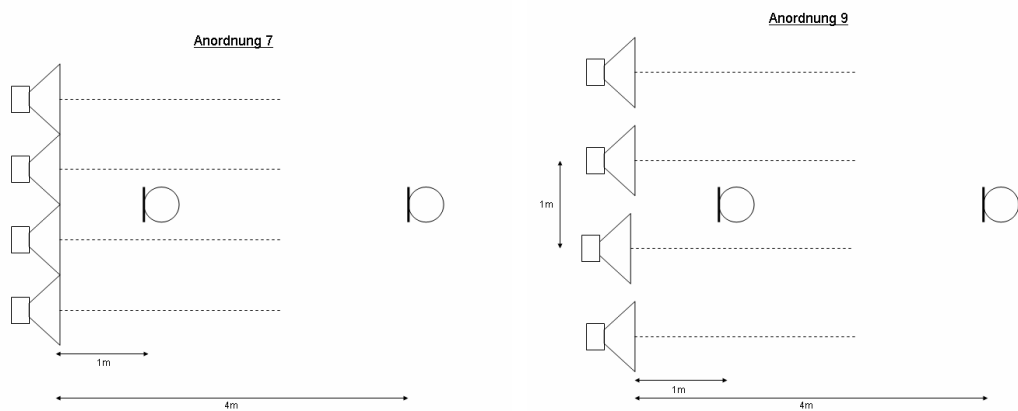


Abb. 44: Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon

Anordnung 8 entspricht Anordnung 7, aber das Mikrofon steht in 4 Metern Entfernung diagonal hinter den Lautsprechern.

6.9 DATENBLÄTTER JBL CONTROL 29 AV

Ulysses Lautsprecher Datenblatt							
Hersteller	JBL PROFESSIONAL						
Typ	C29 AV						
Datenherkunft	Data converted from EASE 3						
dto.							
Importformat	Vollkugel, 5° Auflösung						
Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nennleistung(AES)[W]	150	150	150	150	150	150	150
Schalldruck 1W/1m [dB]	88.0	91.0	92.0	92.0	91.0	90.0	90.0
Nennimpedanz [Ohm]	8	8	8	8	8	8	8
Bündelungsfaktor	1.3	2.2	3.1	5.0	9.2	8.0	8.8
Bündelungsmaß [dB]	1.1	3.4	4.9	7.0	9.6	9.0	9.4
Wirkungsgrad [%]	0.6	0.7	0.6	0.4	0.2	0.2	0.1
Kommentar							

Abb. 45: Datenblatt aus dem Ulysses Speaker Builder

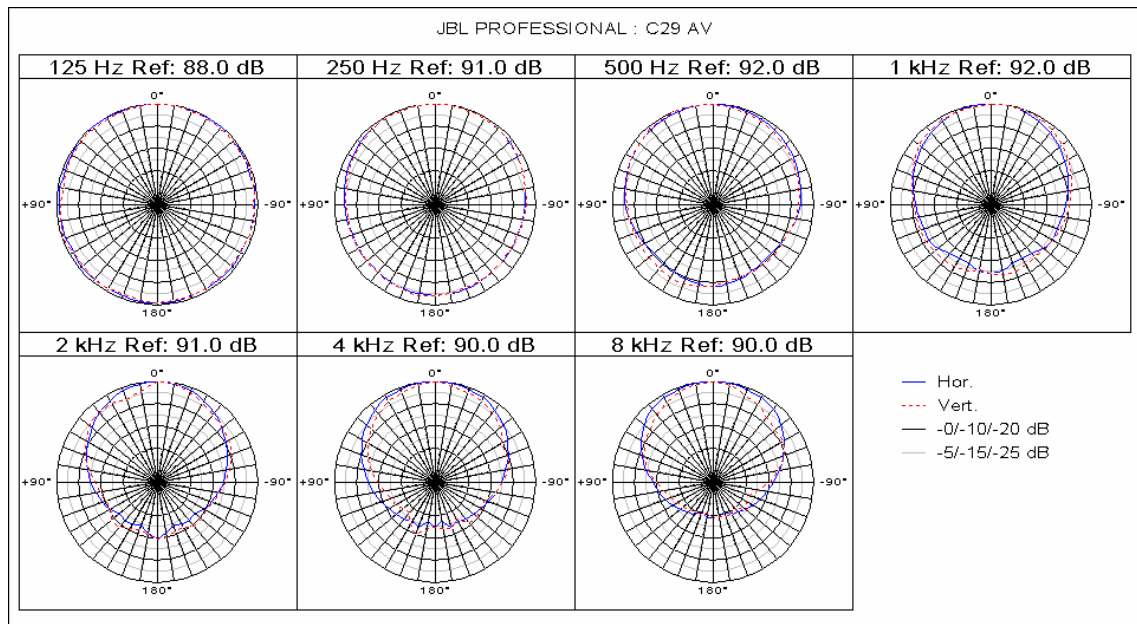


Abb. 46: Polardiagramm aus dem Ulysses Speaker Builder



Control® 29AV High Output Indoor/ Outdoor Monitor Speaker

Professional Series

Key Features:

- ▶ Extended bandwidth, extremely smooth frequency response.
- ▶ 110° x 85° HF coverage, rotatable horn.
- ▶ 110 Watt transformer for 70V or 100V lines, with 8Ω thru.
- ▶ SonicGuard™ overload protection.
- ▶ 200 mm (8") Kevlar cone woofer, 25 mm (1") titanium diaphragm compression driver.
- ▶ Includes InvisiBall™ mounting hardware, plus ten 6 mm attachment points for suspension and optional U-bracket.
- ▶ Sealed input panel cover and screw-down input terminals.

The Control® 29AV utilizes high power components, computer optimized horn and cabinet design and complex network to achieve smooth high fidelity performance, extended bandwidth and well-controlled defined coverage from a compact loudspeaker.

A rotatable high-frequency horn allows use of the speaker in either vertical or horizontal orientation. Smooth frequency response and even coverage ensures excellent sound character throughout the listening area. Partial magnetic shielding allows use of the speaker as close as 230 mm (9") to video monitors.

The top-quality line distribution transformer, designed for minimal insertion loss and reduced saturation, allows use of either 70V or 100V distributed speaker lines. In bypass position, the high 8Ω impedance allows use of multiple speakers on a loudspeaker line.

The included InvisiBall mounting method is simple to install, aims easily and provides a high degree of theft deterrence. InvisiBall allows horizontal rotation of up to 41° off-axis and vertical rotation of up to 36° (horn end inward) or 23° (woofer end inward). Attachment points for the optional MTC-29UB U-bracket allows for compact installation and is particularly useful for low profile underbalcony applications.

Weather resistance has been maximized. The woofer's cone is made of kevlar, surround is pure butyl rubber, and the driver basket is rear loaded to minimize direct exposure. The compression driver's diaphragm is pure titanium. The grille is thermoset composite coated and comes with foam to minimize incursion of water. Nickel/zinc rust-resistant terminals ensure a secure input connection. An MTC-PC2 sealed-entrance cover is included to further protect the speaker's terminals.

JBL's exclusive SonicGuard overload protection is virtually inaudible to the listener, ensuring reliability while providing full fidelity sound.



Available in black or white (-WH). The cabinet will accept a variety of paints to match any décor.

Specifications:

Frequency Range (-10 dB) ¹ :	40 Hz – 19 kHz
Frequency Response (± 3 dB) ² :	45 Hz – 18 kHz
100 Hr Power Capacity ³ :	300 Watts Continuous Program Power 150 Watts Continuous Pink Noise
Maximum SPL @ 1m ³ :	Short-Term: 120 dB; Long-Term: 114 dB
Nominal Sensitivity ⁴ :	91 dB, 1W @ 1 m (3.3 ft)
Nominal Coverage Angle ⁵ :	110° H x 85° V, rotatable
Directivity Factor (Q):	7.2, averaged 500 Hz to 16 kHz
Directivity Index (DI):	8.6 dB, averaged 500 Hz to 16 kHz
Nominal Impedance:	8 ohms
Minimum Impedance:	6.3 ohms @ 230 Hz
Crossover Type:	3rd order High Pass, 2nd order Low Pass with impedance compensation, 2.5 kHz crossover frequency
Transformer Taps:	70V: 110W, 55W, 28W & 14W 100V: 110W, 55W, & 28W Thru Position: 8Ω nominal
Recommended High-Pass:	See chart
Transducers:	
Low Frequency:	200 (8 in) kevlar cone with pure butyl rubber surround, 50 mm (2 in) voicecoil on fiberglass former
High Frequency:	25 mm (1 in) compression driver, pure titanium diaphragm with patented JBL diamond surround
Physical:	
Enclosure Material:	High impact polystyrene
Grille:	Thermoset composite coated steel
Overload Protection:	Full-range power limiting to protect network and transducers. Serviceable internal fuse to protect during exceptional overload conditions.
Environmental:	IEC 529 IP-X4 splashproof rating. Exceeds MilSpec 810 for humidity, salt spray, temperature & UV. Passes Mil-Std-202F for salt spray.
Termination:	Screw-down terminal strip, zinc plated copper base, nickel plated metal screws/washers. Accepts up to 9 mm outside 4 mm inside open lug (#6, #8 or #10 lug), plus bare wire (up to 12 AWG/2.5 mm ²).
Safety Agency Rating:	Transformer is listed per UL1876.
Colors:	Black or white (-WH)
Dimensions (H x W x D):	520 x 306 x 277 mm (20.5 x 12.0 x 10.9 in)
Net Weight (ea):	12.2 kg (26.8 lbs)
Shipping Weight (ea):	14.0 kg (30.8 lbs)
Included Accessories:	1 pc MTC-PC2 input panel cover, InvisiBall mounting base, 6 mm x 260 mm InvisiBall Hex wrench.
Optional Accessories:	MTC-29CM to install speaker down from the ceiling MTC-29UB U-bracket

¹ In Half-space.

² Continuous Pink Noise rating is IEC-shaped pink noise with a 6 dB crest factor for 100 hours continuously. Continuous program power is defined as 3 dB above the Continuous Pink Noise Rating and is a conservative expression of the system's ability to handle normal speech and music program material.

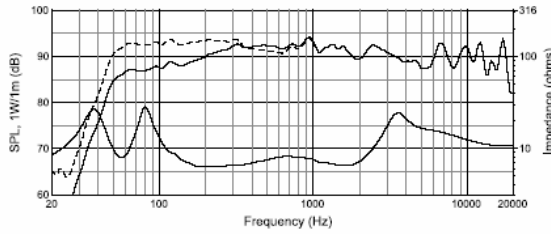
³ Calculated from sensitivity and power handling. Power compression not considered.

⁴ Half-space, averaged 100 Hz to 10 kHz ⁵ 2 kHz to 14 kHz

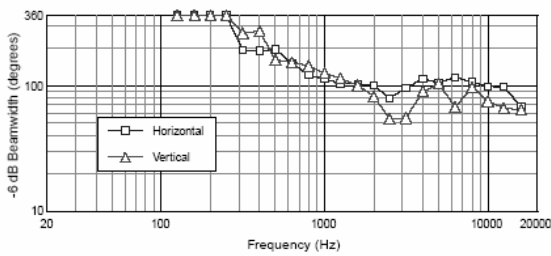
JBL continually engages in research related to product improvements. Changes introduced into existing products without notice are an expression of that philosophy.

Abb. 47: Original Datenblatt Seite 1

► Control® 29AV High Output Indoor/Outdoor Monitor Speaker

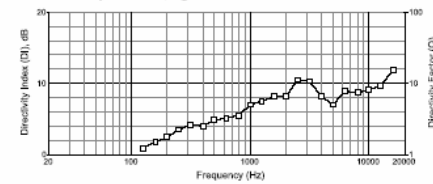


Frequency Response, on axis in half space (2π , dotted line) and full space (4π , solid line) at thru (8Ω) setting, Input Impedance.

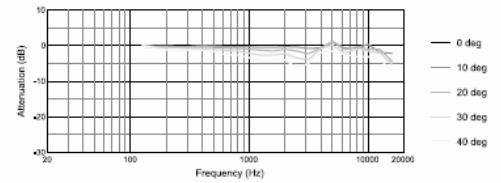


Beamwidth vs. Frequency

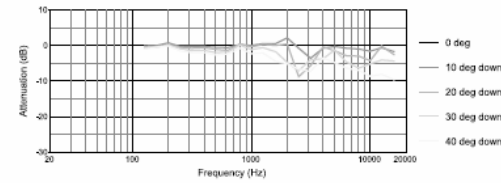
Directivity Index, Q



Horizontal Off Frequency



Vertical Off Axis Frequency Response (down)



Vertical Off Axis Frequency Response (up)

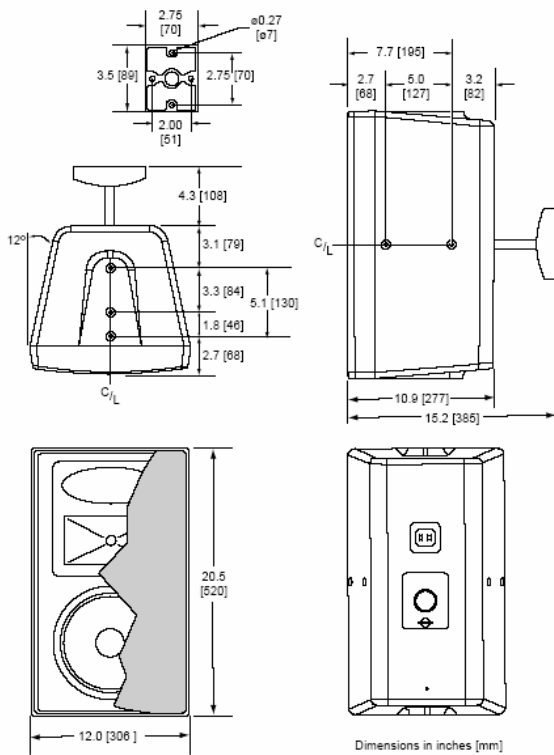
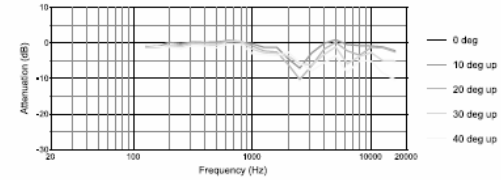


Abb. 48: Original Datenblatt Seite 2

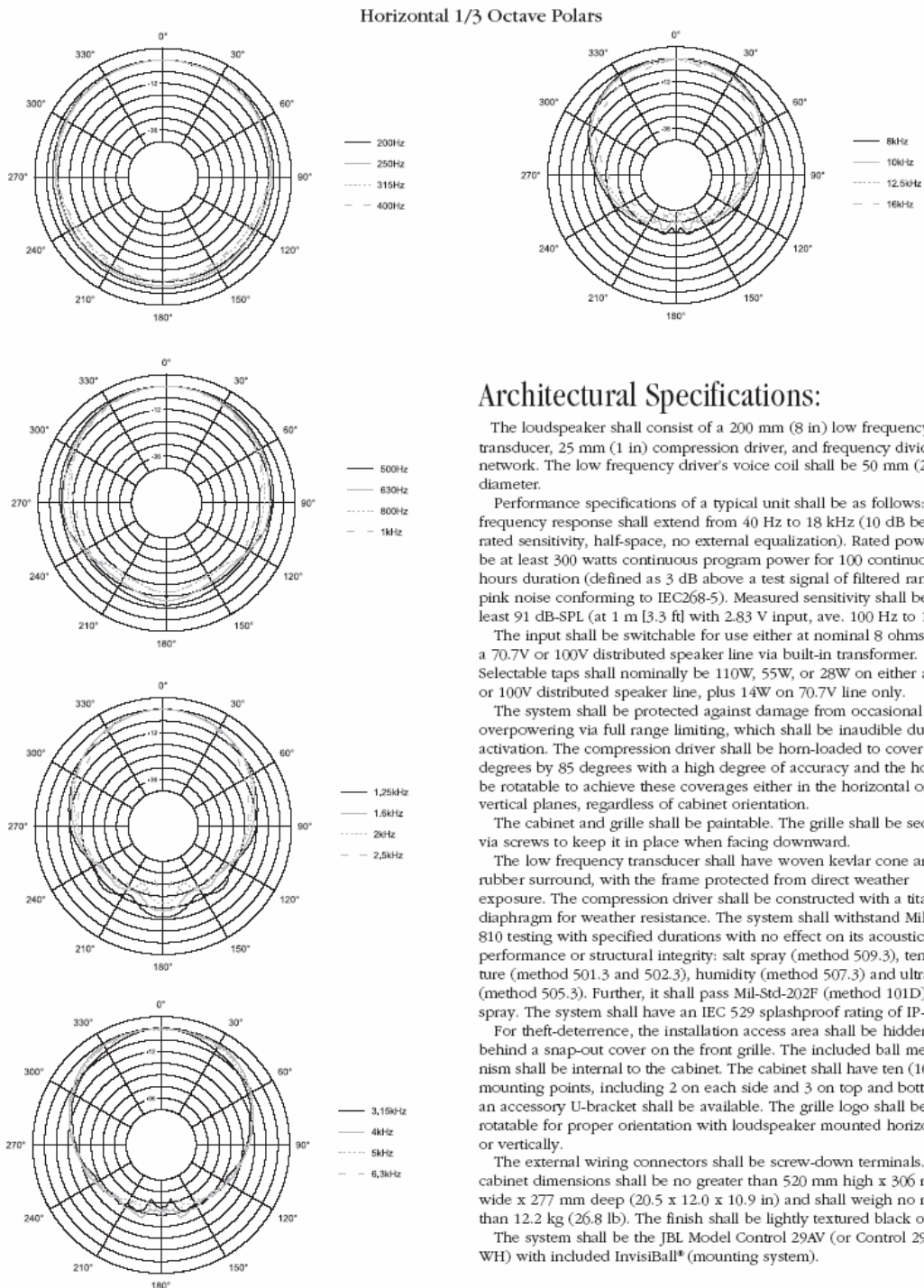
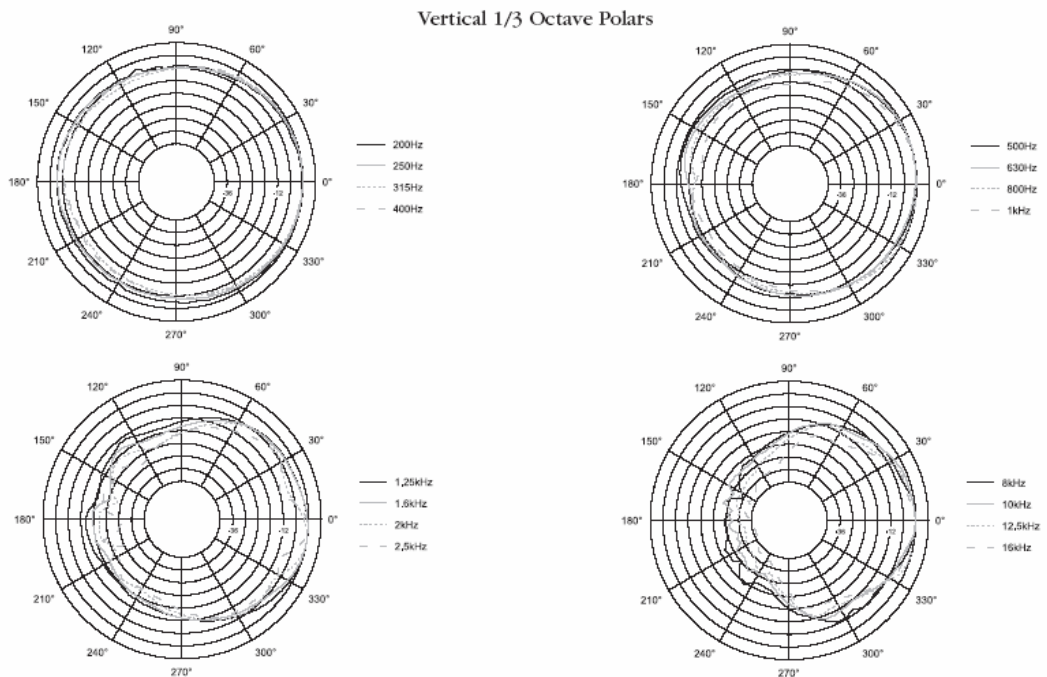


Abb. 49: Original Datenblatt Seite 3

▶ Control® 29AV High Output Indoor/Outdoor Monitor Speaker



High-Pass Frequency Recommendations

The transformer in Control 29AV has been designed to minimize transformer saturation, however it is recommended that when driving the transformer settings with very high signal levels, that the system be high-passed to prevent excessive low frequency content from overloading the transformer and stressing the driving amplifier. The high-pass frequency requirements vary according to the tap setting and how many speakers are connected in parallel. The following chart assumes the goal of totally eliminating all saturation, even at full-voltage (70V or 100V) peaks. You may be able to lower the high-pass frequency when operating at lower volumes. (High-pass slope is 24 dB/oct)

High-Pass Recommendations for Control 29AV

	1 or 2 speakers	3 or more speakers
14 Watt Tap	30 Hz	35 Hz
28 Watt Tap	35 Hz	40 Hz
55 Watt Tap	60 Hz	70 Hz
110 Watt Tap	80 Hz	90 Hz
8 Ohm Setting	No high-pass required	



JBL Professional
 8500 Balboa Boulevard, P. O. Box 2200
 Northridge, CA 91329 USA
 A Harman International Company

SSCONTROL29AV
 CRP 10M 2/01

Abb. 50: Original Datenblatt Seite 4

6.10 IMPEDANZKURVEN JBL CONTROL 29 AV

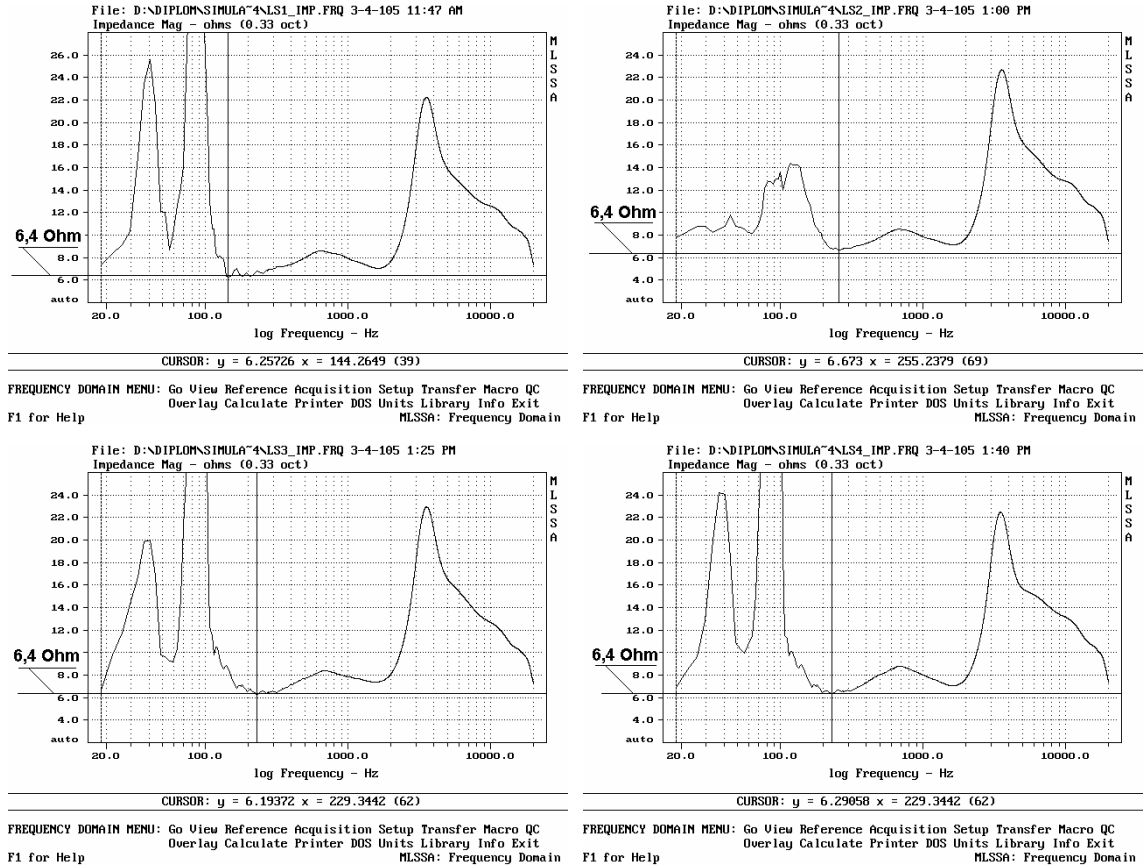


Abb. 51: Mit MLSSA gemessene Impedanzkurven der 4 JBL Control 29 AV

Nach [20] liegt die minimal zulässige Impedanz eines Lautsprechers 20% unter der Nennimpedanz. Die Nennimpedanz der verwendeten JBL-Lautsprecher beträgt 8 Ohm. Dieser Wert ist zum Beispiel bei der Frequenz 1 kHz messbar.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	
8,14	6,59	7,98	7,92	7,71	20,2	13,2	LS 1
14,23	6,68	7,8	7,85	7,74	20,7	13,41	LS 2
9,23	6,59	7,71	7,86	8,11	20,9	13,57	LS 3
9,42	6,67	8,04	8,01	7,71	19,73	13,87	LS 4

Tab. 26: mit MLSSA gemessene Impedanzen in Ohm

6.11 MATHEMATISCHE PEGELADDITION MIT TABELLEN UND DIAGRAMMEN

Alle Tabellen und Diagramme aus denen hervorgeht wie Pegel zu addieren sind, basieren auf Formel (15).

Pegeldifferenz in dB	Pegelzuschlag in dB	Pegeldifferenz in dB	Pegelzuschlag in dB
0	3	11	0,3
1	2,5	12	0,3
2	2,1	13	0,2
3	1,8	14	0,2
4	1,5	15	0,1
5	1,2	16	0,1
6	1	17	0,1
7	0,8	18	0,1
8	0,6	19	0
9	0,5	20	0
10	0,4		

Tab. 27: *Tabelle zur Berechnung des Gesamtpegels aus zwei Einzelpegeln*

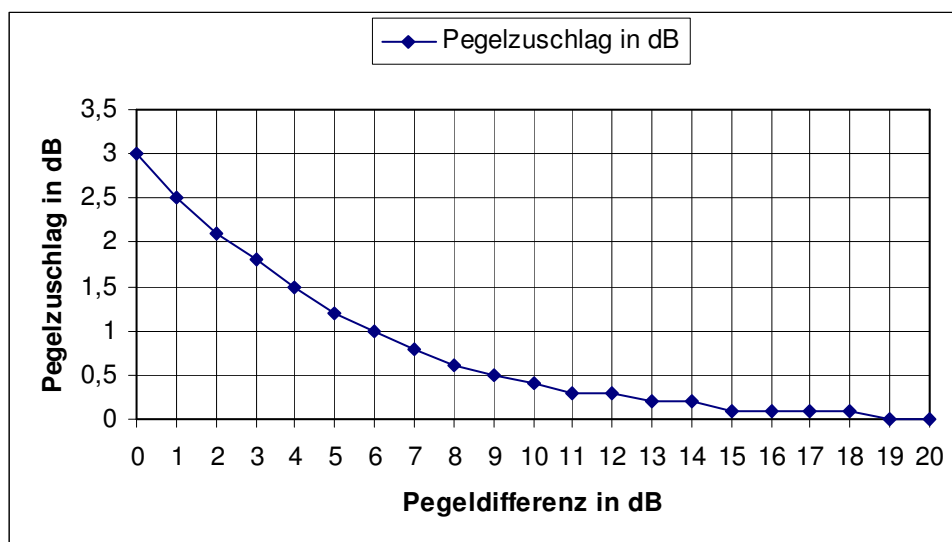


Abb. 52: *Diagramm zur Berechnung des Gesamtpegels aus zwei Einzelpegeln*

6.12 BEWERTUNGSFILTER FÜR SCHALLDRUCKPEGEL

Die Frequenzbewertung nach der Bewertungskurve A ist dem menschlichen Hörempfinden nachgebildet. A-bewertete Schalldruckpegel dienen der objektiven Beurteilung von Lautstärken im hörbaren Frequenzbereich und werden neben unbewerteten Schalldruckpegeln am häufigsten verwendet. Außer der Bewertungskurve A sind noch die Bewertungskurven B, C, D, U, Z genormt worden [5].

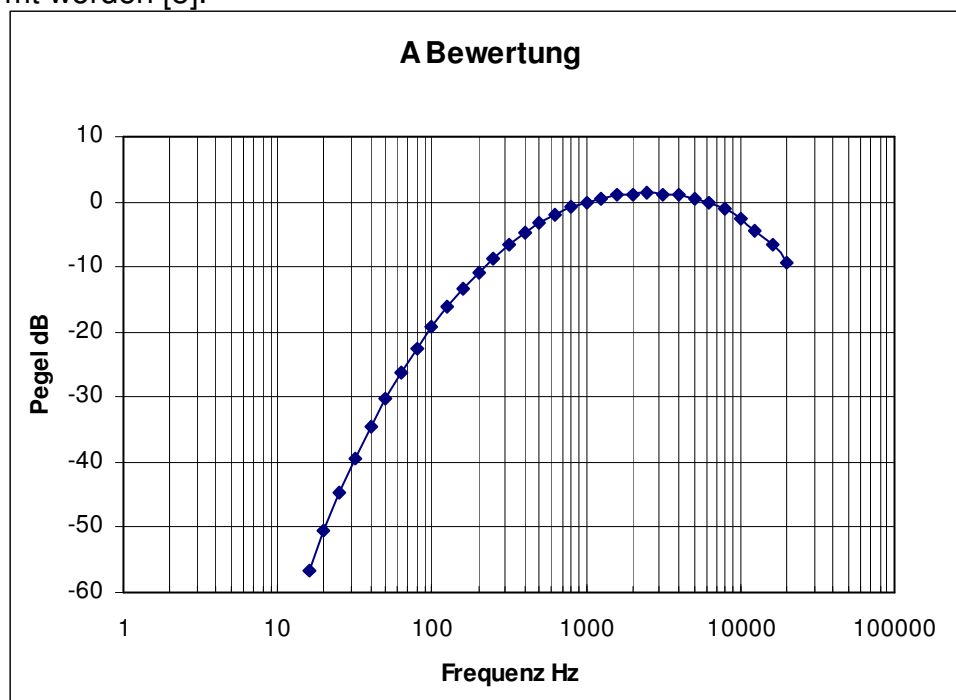


Abb. 53: *Frequenzbewertungskurve A*

Frequenz Hz	Pegel dB	Frequenz Hz	Pegel dB	Frequenz Hz	Pegel dB
16	-56,7	200	-10,9	2500	1,3
20	-50,5	250	-8,6	3150	1,2
25	-44,7	315	-6,6	4000	1
32	-39,4	400	-4,8	5000	0,5
40	-34,6	500	-3,2	6300	-0,1
50	-30,2	630	-1,9	8000	-1,1
64	-26,2	800	-0,8	10000	-2,5
80	-22,5	1000	0	12500	-4,3
100	-19,1	1250	0,6	16000	-6,6
125	-16,1	1600	1	20000	-9,3
160	-13,4	2000	1,2		

Tab. 28: *A-Bewertung der 32 Terzmittenfrequenzen*

6.13 DIE VERWENDETE AUSRÜSTUNG

In den Modellversuchen verwendete Ausrüstung:

4 Lautsprecher: JBL Control 29 AV

Verstärker: AB International Precedent Series 600 LX

Messmikrofon: Beyerdynamic MM1

Mikrofonvorverstärker: Symetrix 2-Kanal

MLSSA-Messcomputer

Audio Analyser: Klark Technik DN 6000 mit Messmikrofon Klark Technik 6051

Schallpegelmesser: Analoger Präzisionsschallpegelmesser FS 18

Echtheffektivwertmessgerät: Multimeter Fluke 85

CD-Player

Kabel und Adapter

6.14 BERECHNUNGEN IN DEN MODELLVERSUCHEN

Stellvertretend für alle Berechnungen in den Modellversuchen sind hier die Berechnungen zu Anordnung 9 aufgelistet.

1. rein mathematische Pegelrechnung							
Gesamtpegel= $10 \cdot \log(10^{\text{Pegel1}/10} + 10^{\text{Pegel2}/10})$							
gemessene Einzelpegel in dB(A)				berechneter Gesamtpegel in dB(A):		gemessener Gesamtpegel in dB(A) fast:	
LS einzeln				FS18 dB(A) Fast		Signal:	
LS 1	LS 2	LS 3	LS 4				
69	83	81	64	85,2617631	85	87	1 kHz
64	74	71	69	76,8271612	77	85	
76	81	81	76	85,2036104	85	88	1/6 oct PN
76	76	77	75	82,0780378	82	82	
72	78	78	73	82,0949631	82	84	PN
72	73	73	73	78,791349	79	79	
65	68	68	65	72,7746486	73	75	Sprache
63	63	65	63	69,6132922	70	70	
74	79	80	75	83,7323294	84	85	Musik
74	74	75	73	80,0780378	80	80	
64	73	73	65	76,587687	77	MLSSA: 76,4	MLSSA
64	66	66	65	71,3469679	71	MLSSA: 70,8	

Tab. 29: *mathematische Pegelrechnung Anordnung 9 im Seminarraum*

6 Anhang

2. Hopkins-Stryker-Gleichung										
$L_t = L_w + 10 \cdot \log(Q / (4 \cdot \pi \cdot r^2) + 4 / S_a)$										
Lw, Q und Sa sind frequenzabhängig, äquivalente Absorptionsfläche Sa aus Ulysses-Modell (richtig modelliert?)										
Berechnung von Lw:										
$L_w = 10 \cdot \log(P_{ak} / 10^{-12})$										
Pak=Pel*Wirkungsgrad (frequenzabhängig)										
Pel=effektive Spannung am LS ^2 / Impedanz (frequenzabhängig) //p-akustisch.xls rechnet mit Messergebnissen - Achtung: Raum!										
Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
Q	1,3	2,2	3,1	5	9,2	8	8,8	aus Speaker-Builder-Datenblatt		
Wirkungsgrad [%]	0,6	0,7	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1			
Nennimpedanz [Ohm]	8	8	8	8	8	8	8			
gemessene Imp. mit MLSSA [Ohm]										
LS 1	8,14	6,59	7,98	7,92	7,71	20,2	13,2			
LS 2	14,23	6,68	7,8	7,85	7,74	20,7	13,41			
LS 3	9,23	6,59	7,71	7,86	8,11	20,9	13,57			
LS 4	9,42	6,67	8,04	8,01	7,71	19,73	13,87			
gemessene Ueff: 0,7 V		Ueff (äquivalente Gleichspannung) bei allen Frequenzen! Daher nur arithmetisches Mittel der Pegel bilden, weil nicht 7*Ueff dem LS zugeführt wird!!!								
bei einem LS:										
Pel [W]	0,054	0,074	0,062	0,061	0,063	0,025	0,036			
Pak [W]	3E-04	5E-04	4E-04	2E-04	1E-04	5E-05	4E-05			
Lw [dB]	85,14	87,12	85,71	83,89	80,99	76,9	75,6			
Sa (nach Messungen)	34,9	49,8	58,1	63,4	69,7	87,2	139,5			
Sa (nach Modell)	69,3	53	58,3	57,2	60	83,2	118,3			
								Summe der Pegel in den Bändern:	oder Durchschnitt ????	10Log(Mittelwert aus entlog. Werten)
Lt dB SPL, r1=1m	78,53	81,2	80,7	80,53	79,96	75,24	74,23	87,7263288	78,6261807	79,27534836
Lt dB SPL, r2=4m	75,97	76,73	74,96	73,33	71,13	66,23	64,2	82,0227167	71,7930933	73,57173627
A-Bewertung (Dämpfung in dB):										
	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1			
Lt dB (A), r1=1m	62,43	72,6	77,5	80,53	81,16	76,24	73,13	85,8260715	74,7976093	77,3750911
Lt dB (A), r2=4m	59,87	68,13	71,76	73,33	72,33	67,23	63,1	78,3529261	67,9645219	69,90194567
bei mehreren LS:										
Ltges=Lt1+Lt2+Lt3+Lt4 //Lt von jeder Quelle am Empfängerpunkt beinhaltet auch die Raumreflexionen und die Richteigenschaften der LS!!!										
Winkel der Messposition zur LS-Hauptachse:	LS1 r1=1,8 56°	LS1 r2=4,2 21°	LS2 r1=1,1 27°	LS2 r2=4,0 7°	// aus sym. LS-Anordnung und Pythagoras siehe Skizze					
Abzug in dB bei LS1r1	0	-2	-3	-5	-8	-5	-7	aus Speaker-Builder Polardiagramm		
Abzug in dB bei LS1r2	0	0	-1	-1	-2	-1	-1			
Abzug in dB bei LS2r1	0	0	-1	-2	-3	-1	-1			
Abzug in dB bei LS2r2	0	0	0	0	0	0	0			

6 Anhang

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
Qrel=Q*10^(Abzug dB bei Winkel/10)										
Qrel bei Winkel LS1r1	1,3	1,388	1,554	1,581	1,458	2,53	1,756			
Qrel bei Winkel LS1r2	1,3	2,2	2,462	3,972	5,805	6,355	6,99			
Qrel bei Winkel LS2r1	1,3	2,2	2,462	3,155	4,611	6,355	6,99			
								Summe der Pegel in den Bändern:	oder Durchschnitt ????	10Log(Mittelwert aus entlog. Werten)
r1										
Lt1=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*1,8^2)+4/Sa) // Sa aus Messung										
Lt1 [f]	76,8	77,71	76	73,97	70,69	67,24	64,16	82,8168566	72,3668287	74,36587619
Lt4 [f] = Lt1 [f]	76,8	77,71	76	73,97	70,69	67,24	64,16	82,8168566	72,3668287	74,36587619
Lt2=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*1,12^2)+4/Sa)										
Lt2 [f]	78,09	80,55	79,23	78,09	76,43	73,42	72,34	86,1187338	76,8790975	77,66775341
Lt3 [f] = Lt2 [f]	78,09	80,55	79,23	78,09	76,43	73,42	72,34	86,1187338	76,8790975	77,66775341
Ltges=Lt1+Lt2+Lt3+Lt4	83,51	85,38	83,93	82,53	80,47	77,37	75,96	90,7949126	81,306685	82,34393215
Ltges A-Bewertung	67,41	76,78	80,73	82,53	81,67	78,37	74,86	87,7559998	77,4781136	79,30501943
Lt1=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*1,8^2)+4/Sa) // Sa aus Modell										
Lt1 [f]	74,67	77,52	75,99	74,26	71,1	67,32	64,46	82,3866935	72,1882985	73,93571308
Lt4 [f] = Lt1 [f]	74,67	77,52	75,99	74,26	71,1	67,32	64,46	82,3866935	72,1882985	73,93571308
Lt2=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*1,12^2)+4/Sa)										
Lt2 [f]	76,61	80,45	79,23	78,21	76,54	73,45	72,39	85,9229083	76,6951832	77,4719279
Lt3 [f] = Lt2 [f]	76,61	80,45	79,23	78,21	76,54	73,45	72,39	85,9229083	76,6951832	77,4719279
Ltges=Lt1+Lt2+Lt3+Lt4	81,77	85,25	83,92	82,69	80,64	77,41	76,05	90,5257942	81,1027921	82,07481378
Ltges A-Bewertung	65,67	76,65	80,72	82,69	81,84	78,41	74,95	87,8324816	77,2742207	79,38150122
r2										
Lt1=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*4,27^2)+4/Sa) // Sa aus Messung										
Lt1 [f]	75,94	76,66	74,72	72,95	70,17	65,57	63,32	81,7940492	71,3325079	73,34306882
Lt4 [f] = Lt1 [f]	75,94	76,66	74,72	72,95	70,17	65,57	63,32	81,7940492	71,3325079	73,34306882
Lt2=Lw1+10log(Q/(4*PI()*4,03^2)+4/Sa)										
Lt2 [f]	75,97	76,72	74,95	73,32	71,1	66,2	64,16	82,0110264	71,7732336	73,560046
Lt3 [f] = Lt2 [f]	75,97	76,72	74,95	73,32	71,1	66,2	64,16	82,0110264	71,7732336	73,560046
Ltges=Lt1+Lt2+Lt3+Lt4	81,98	82,71	80,86	79,16	76,68	71,92	69,78	87,9244926	77,582338	79,47351223
Ltges A-Bewertung	65,88	74,11	77,66	79,16	77,88	72,92	68,68	84,1257768	73,7537666	75,67479636
r2 (Sa aus Modell)										
Lt1=Lw1+10log(Qrel/(4*PI()*4,27^2)+4/Sa)										
Lt1 [f]	73,16	76,42	74,7	73,3	70,63	65,7	63,68	81,2421144	71,0854348	72,79113404
Lt4 [f] = Lt1 [f]	73,16	76,42	74,7	73,3	70,63	65,7	63,68	81,2421144	71,0854348	72,79113404
Lt2=Lw1+10log(Q/(4*PI()*4,03^2)+4/Sa)										
Lt2 [f]	73,21	76,48	74,94	73,64	71,47	66,31	64,46	81,4876789	71,5025415	73,03669849
Lt3 [f] = Lt2 [f]	73,21	76,48	74,94	73,64	71,47	66,31	64,46	81,4876789	71,5025415	73,03669849
Ltges=Lt1+Lt2+Lt3+Lt4	79,21	82,47	80,84	79,5	77,09	72,04	70,11	87,387232	77,3222702	78,93625157
Ltges A-Bewertung	63,11	73,87	77,64	79,5	78,29	73,04	69,01	84,3002218	73,4936987	75,84924139

Tab. 30: Hopkins-Stryker Anordnung 9 im Seminarraum

3. Ulysses										
Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
inkl. 1. Reflexion und RT60(M)								Durchschnitt:	Probe:	
Einzelfrequenz r1	84	85,7	86,8	84,3	83,4	82,4	79,4	84,5	84,525132	
r2	82,7	84,3	81,4	79,6	79,3	75,9	74,4	80,9	80,86455	
Oktavband r1	84	85,6	86,7	84,3	83,4	82,4	79,4	84,5	84,473985	
r2	82,7	84,3	81,4	79,6	79,3	75,9	74,4	80,9	80,86455	
Energetisch r1	84,3	84,7	84,4	82,8	80	79,7	79,2	82,8	82,761717	
r2	82,9	82,6	81,8	80	76,7	75,6	74	80,2	80,182896	
inkl. 1. Reflexion und Sabine										
Einzelfrequenz r1	82,2	85,6	86,8	84,5	83,5	82,4	79,4	84,4	84,455715	
r2	79,9	84,2	81,4	79,9	79,5	76	74,7	80,7	80,672649	
Oktavband r1	82,2	85,5	86,7	84,5	83,5	82,4	79,4	84,4	84,404259	
r2	79,9	84,2	81,4	79,9	79,5	76	74,6	80,7	80,670862	
Energetisch r1	82,6	84,6	84,4	82,9	80,2	79,8	79,3	82,6	82,63799	
r2	80,3	82,3	81,8	80,3	77	75,7	74,4	79,9	79,914779	
								dB(A)	dB SPL	
MLSSA Probe bei r2	60,2	61,4	61,9	63,4	64,4	62,3	65,8	70,8	72,6	71,589188
A-Bewertung:	44,1	52,8	58,7	63,4	65,6	63,3	64,7	70,743		62,398506
dB SPL bei MLSSA von 32-16k!!!										
Probe 32-16k: 72,5 dB SPL mit $10 \cdot \log(\text{Summe der entlog. MLSSA Meßwerte!!!})$										

Tab. 31: *Ulysses Anordnung 9 im Seminarraum*

6.15 DATEN-CD

Auf der beiliegenden Daten-CD sind alle Dateien gespeichert, die im Laufe der Arbeit erstellt, recherchiert oder von IFBcon als ‚Freeware‘ überlassen wurden: Messprotokolle, Messdaten, Berechnungen, Grafiken, der Text dieser Ausarbeitung, Kopien von Internetseiten, die Testsignale der Audio-CD im Wave-Format, Ulysses als Demo-Version.

7 VERZEICHNISSE

7.1 QUELLEN UND LITERATUR

- [1] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: **Physik für Ingenieure**. 6. Auflage
Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1997
- [2] Ahnert, W.; Steffen, F.: **Beschallungstechnik Grundlagen und Praxis**.
Stuttgart/Leipzig: Hirzel 1993
- [3] Davis; C.&D.: **Sound System Engineering** Second Edition
Boston/Oxford/...: Focal Press/Butterworth-Heinemann 1997
- [4] Veit, I.: **Technische Akustik**. 5. Auflage Würzburg: Vogel 1996
- [5] Müller, G.; Möser, M.: **Taschenbuch der Technischen Akustik**. 3. Aufl.
Berlin/Heidelberg/New York: Springer 2004
- [6] Papula, L.: **Mathematische Formelsammlung**. 6. Auflage
Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 2000
- [7] Marinescu, M.: **Wechselstromtechnik Grundlagen und Beispiele**.
Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1999
- [8] Brüel&Kjær: **Schallmessung**. Nærum, Dänemark: 1984
- [9] Brüel&Kjær: **Verkehrs- und Arbeitslärm in der Nachbarschaft**.
Nærum, Dänemark: 1989
- [10] Goertz, A.: **Ulysses im Test**. Sonderdruck aus Professional System 5/99
Bischofsheim: IFBsoft
- [11] Löwer, V.: **Beschallungstechnik in Mehrzweckgebäuden**. Sonderdruck
aus Das Bauzentrum 3/88 und 4/88 Bischofsheim: IFBcon
- [12] Holtmeyer, V.: **Simulation von Line-Array-Lautsprechersystemen mit
der CAAD Software Ulysses**. Diplomarbeit Fachhochschule Wiesbaden

- Studiengang Fernsehtechnik und elektronische Medien 2002
- [13] Marten, M.: **Messtechnische Verifikation computergestützter Berechnungen akustischer Eigenschaften virtueller Räume.** Diplomarbeit Fachhochschule Wiesbaden Studiengang Fernsehtechnik und elektronische Medien 1999
- [14] Schöbel, G.: **Nachhallmessung in Abhängigkeit örtlicher Verteilung von Absorptionsmaterial.** Diplomarbeit Fachhochschule Wiesbaden Studiengang Fernsehtechnik 1998
- [15] Brown, P.: **Why all the fuss about power?.** Syn-Aud-Con Newsletter Vol.33 No.1 Winter 2005, p.10 - 13.
- [16] Johnston, J.: **Sense and sensitivity.** Syn-Aud-Con Newsletter Vol.33 No.1 Winter 2005, p. 24 - 25.
- [17] Löwer, V.: **The basics of electroacoustics.** Skript zum Vortrag beim CAVIS 2005. Messe Frankfurt 2005
- [18] Holtmeyer, V.: **Vertrauen ist gut – Kontrolle ist besser: Lautsprecher-Controller.** Skript zum Vortrag beim CAVIS 2005. Messe Frankfurt 2005
- [19] Goertz, A.: **Einmessung und Inbetriebnahme der Beschallungsanlage für Sprache und Musik im Berliner Olympiastadion.** Skript zum Vortrag beim CAVIS 2005. Messe Frankfurt 2005
- [20] Nubert, G.: **Dauerthema Impedanz.** Download aus der Serie „Technik Satt“ 11/2003 von www.nubert.de , S. 38 - 39.
- [21] Ulysses Online Hilfe: **Pegel- und Zeitberechnung.** Ulysses Design Engine 2.50. Bischofsheim: IFBsoft www.ifbcon.de
- [22] **MLSSA Reference Manual Version 10.0.**
Harmonic Design GmbH&Co, Philippsburg-Huttenheim
www.harmonic-design.com , www.mlssa.com
- [23] **AES 2-1984 (r2003)** Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement
- [24] **IEC 651** Schallpegelmesser 1979

- [25] Broschart, J.; Tentrup, I.: **Mathematische Grundlagen der Harmonie.** in Der Klang der Sinne. GEO 11/2003, S. 80
- [26] Goertz, A.: **L-Acoustics KUDO: Alles über das neue Line-Array Design.** Production Partner 12/2004, S. 76 – 81
- [27] Goertz, A.: **NTI Acoustilyzer AL1.** Production Partner 4/2005, S. 44 - 53

7.2 ABBILDUNGEN

Abb. 1:	Bündelungsfaktor Q einer Kugelquelle	7
Abb. 2:	Prinzipieller Aufbau eines Schallpegelmessers: Mikrofon, Vorverstärker, Frequenzbewertung, Verstärker, Effektivwertglied mit wählbarer Zeitbewertung und die Pegelausgabe.....	8
Abb. 3:	Die vier Module des Ulysses-Software-Pakets	16
Abb. 4:	dreidimensionales Ulysses-Modell des Seminarraums mit Einzelflächen und der blau markierten Hörfläche über dem Boden.	21
Abb. 5:	skizzierter Querschnitt des Aufbaus eines Lautsprecher auf einem Tisch.....	22
Abb. 6:	Nachhallzeiten im Seminarraum, gemessen mit MLSSA und simuliert mit Ulysses	23
Abb. 7:	Lageskizze der Freifläche in Bischofsheim, ca. 250m ²	24
Abb. 8:	Analyse des Signalverlaufs von Rosa Rauschen mit einem Crest-Faktor von 6 dB; Ausschnitt eines Screen-Shots aus Cool Edit Pro	27
Abb. 9:	Frequenzanalyse in Cool Edit Pro: Das Spektrum von Rosa Rauschen fällt mit 3 dB pro Oktave (Frequenzverdoppelung)	27
Abb. 10:	Analyse des Signalverlaufs des Sinustons mit der Frequenz 1 kHz. In der digitalen Analyse ist der ‚analoge‘ Crest-Faktor einer Sinusschwingung nicht abzulesen.....	28
Abb. 11:	Screen-Shot aus der MLSSA: Zeitverlauf eines MLS-Signals wiedergegeben durch einen Lautsprecher	29
Abb. 12:	Frequenzgang der MLS - in der Darstellung auf Terzbänder geglättet	30

Abb. 13:	Skizze zu Anordnung 1: Der Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher beträgt 1 m bzw. 4 m	35
Abb. 14:	Draufsicht auf die Simulation von Anordnung 1 im Freien. Im Mittelpunkt der Hörfläche befindet sich der Lautsprecher.....	38
Abb. 15:	Anordnung 1 im Seminarraum – der grüne Lautsprecher in der Raummitte und die blaue Hörfläche in 1,05 m Höhe	43
Abb. 16:	Frequenzgangdarstellungen für einen Lautsprecher aus einer Impulsantwort heraus berechnet und auf Terzbänder geglättet. Links: die ersten 35 ms der Impulsantwort. Rechts: die komplette Impulsantwort, ca. 2 Sekunden	46
Abb. 17:	Skizze zum Aufbau mit zwei Lautsprechern nach Anordnung 2.....	49
Abb. 18:	Ulysses-Simulationen von Anordnung 2 im Freien und im Seminarraum. Direktschallverteilung und Direktschallverteilung inkl. früher Reflexionen für das Oktavband bei 125 Hz	53
Abb. 19:	Verhältnis von Direktschall zu reflektiertem Schall in Anordnung 2.	53
Abb. 20:	Variationen des zweiten Modellversuchs: Anordnung 3 und Anordnung 5.....	55
Abb. 21:	Frequenzgänge an den Messpunkten r1 (links) und r2 (rechts) in der Versuchsanordnung 3	57
Abb. 22:	Skizze zum dritten Modellversuch mit Versuchsanordnung 9	59
Abb. 23:	Frequenzgang und Impulsantwort aller 4 Lautsprecher in Versuchsanordnung 8	61
Abb. 24:	Ulysses-Modell des Sitzungssaals im Offenbacher Rathaus mit jeweils neun Deckenlautsprechern für die Abgeordneten und den Publikumsbereich sowie zwei Lautsprechern zur Musikeinspielung	70
Abb. 25:	Im Direktfeld eines Lautsprechers aufgenommene Impulsantworten. Links: nur eine Lautsprecherreihe. Rechts: alle drei LS-Reihen.....	71
Abb. 26:	Impulsantworten im Diffusfeld. Links: bei einer LS-Reihe. Rechts: alle drei LS-Reihen.....	72
Abb. 27:	Gottlieb-Daimler-Stadion. Rot: Tribünen-LS. Blau: Innenraum-LS ..	73

Abb. 28:	Impulsantworten des Stadions. Links: ein Lautsprecher. Rechts: alle Lautsprecher. Deutlich zu erkennen: späte Reflexionen von der gegenüberliegenden Tribüne.....	75
Abb. 29:	von MLSSA berechnete akustische Parameter. Rot markiert: Nachhallzeiten im Stadion ohne Subwoofer gemessen.....	75
Abb. 30:	Hornlautsprecher auf dem Boden und der Kugellautsprecher auf einem Stativ im leeren Hornbergtunnel	76
Abb. 31:	gemessene Schalldruckpegel im Tunnelabschnitt mit gerader Decke	77
Abb. 32:	mit MLSSA gemessene Nachhallzeiten im Tunnel über alle Messpunkte gemittelt. Links im flachen Tunnelabschnitt. Rechts bei gewölbter Decke.....	78
Abb. 33:	Empfehlung zur Lautsprecherausrichtung im Hornbergtunnel.....	78
Abb. 34:	äquivalente Absorptionsfläche „Sa“ und Nachhallzeiten berechnet aus der Ulysses-Raumsimulation	86
Abb. 35:	äquivalente Absorptionsfläche „Sa“ berechnet aus den eingegebenen Messwerten für die Nachhallzeit.....	86
Abb. 36:	Analyse für den Sinus aus Cool Edit (Aussteuerung, Crest-Faktor, Spektrum).....	88
Abb. 37:	Analyse des 1/6 oct. PN	88
Abb. 38:	Analyse des breitbandigen PN	88
Abb. 39:	Analyse des Sprach-Samples.....	89
Abb. 40:	Analyse der Rock-Musik.....	89
Abb. 41:	Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon.....	89
Abb. 42:	Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon.....	90
Abb. 43:	Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon.....	90
Abb. 44:	Skizzen der Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon.....	90
Abb. 45:	Datenblatt aus dem Ulysses Speaker Builder.....	91
Abb. 46:	Polardiagramm aus dem Ulysses Speaker Builder.....	91
Abb. 47:	Original Datenblatt Seite 1.....	92
Abb. 48:	Original Datenblatt Seite 2.....	93

Abb. 49: Original Datenblatt Seite 3.....	94
Abb. 50: Original Datenblatt Seite 4.....	95
Abb. 51: Mit MLSSA gemessene Impedanzkurven der 4 JBL Control 29 AV	96
Abb. 52: Diagramm zur Berechnung des Gesamtpegels aus zwei Einzelpegeln.....	97
Abb. 53: Frequenzbewertungskurve A.....	98

7.3 TABELLEN

Tab. 1: Verhältnisse und Pegel der Wechselgrößen in der Elektrotechnik und der Akustik.....	12
Tab. 2: Gewichtung der Gesamtleistung für den Gesamtpegel in Ulysses..	18
Tab. 3: frequenzabhängige Impedanz der JBL Control 29 AV gemessen mit MLSSA als Grundlage für die Berechnungen mit Hopkins-Stryker..	32
Tab. 4: frequenzabhängige und gerundete Ergebnisse für einen Lautsprecher im Freien nach Hopkins-Stryker (16)	36
Tab. 5: gerundete Pegel für den gesamten Frequenzbereich nach (16) und (34)	37
Tab. 6: Ergebnisse aus Ulysses für Anordnung 1 im Freien.....	37
Tab. 7: Messergebnisse Anordnung 1 im Freien	39
Tab. 8: in Anordnung 1 von MLSSA berechnete Schalldruckpegel in dB	41
Tab. 9: Gegenüberstellung MLSSA und Schallpegelmesser FS18 in Anordnung 1	41
Tab. 10: Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 1 im Freien. H-S steht für Hopkins-Stryker. Unterschiede < 2,5 dB sind grün markiert	42
Tab. 11: berechnete Schalldruckpegel für r1 und r2 nach Hopkins-Stryker (18) und (34) sowie aus den Ulysses-Simulationen für Anordnung 1 im Seminarraum.....	44
Tab. 12: Messergebnisse für Anordnung 1 im Seminarraum.....	45

Tab. 13:	Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 1 im Seminarraum. Abweichungen < 2,5 dB sind grün markiert und unterstrichen.....	48
Tab. 14:	Gegenüberstellung der Berechnungen und Messungen für Anordnung 2 im Freien. M-P steht für mathematische Pegelrechnung. Unterschiede < 2,5 dB sind grün markiert und unterstrichen.....	51
Tab. 15:	Gegenüberstellung der von MLSSA für r_2 berechneten Pegel im Freien	52
Tab. 16:	Zusammenfassung der Ergebnisse für Anordnung 2 im Raum	54
Tab. 17:	Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 3 im Raum	56
Tab. 18:	Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 5 im Raum	58
Tab. 19:	Gegenüberstellung der Ergebnisse für Anordnung 9.....	60
Tab. 20:	Schalldruckpegel im Diffusfeld des Seminarraums.....	61
Tab. 21:	Vergleich der Messergebnisse für die Gesamtpegel in dB(A) Fast. FA1 bedeutet Anordnung 1 im Freien. Besonders hervorzuhebende Ergebnisse sind grün markiert und unterstrichen.	62
Tab. 22:	Bilanz der Übereinstimmungen zwischen Berechnungen und Messungen in den Modellversuchen	68
Tab. 23:	Maximaler Schalldruckpegel bei Test-Musik an einem Sitzplatz	74
Tab. 24:	mit MLSSA gemessene Nachhallzeiten.....	85
Tab. 25:	einige Raumresonanzen für den als Rechteckraum betrachteten Seminarraum 201 an der Fachhochschule mit $c = 340$ m/s.....	87
Tab. 26:	mit MLSSA gemessene Impedanzen in Ohm.....	96
Tab. 27:	Tabelle zur Berechnung des Gesamtpegels aus zwei Einzelpegeln	97
Tab. 28:	A-Bewertung der 32 Terzmittenfrequenzen.....	98
Tab. 29:	mathematische Pegelrechnung Anordnung 9 im Seminarraum	99
Tab. 30:	Hopkins-Stryker Anordnung 9 im Seminarraum	101
Tab. 31:	Ulysses Anordnung 9 im Seminarraum	102