



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen

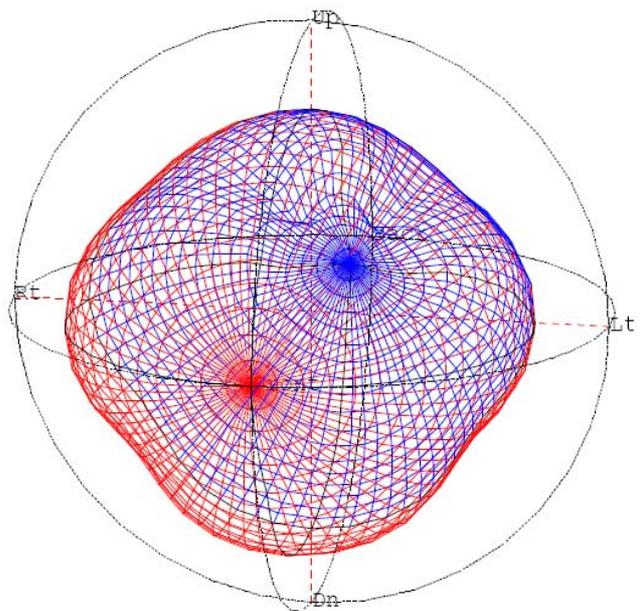


EnBau

Raumakustisches Monitoring

in

passiv klimatisierten und Bauteil-aktivierten Gebäuden



Detlef Hennings
Dr. rer. nat.

D - 51 065 Köln
Tel. +49-(0)221-372445
email: detlef.hennings@eclim.de
internet: www.eclim.de

Raumakustisches Monitoring in passiv klimatisierten und Bauteil-aktivierten Gebäuden

Ergebnisbericht zum Projekt:

**Optimierung der Raumakustik in passiv klimatisierten Räumen
mit schallharter Decke - Teil 2:
Begleituntersuchung und Messungen an realisierten Beispielen**

im Rahmen des Förderprogramms 'EnOB'
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
Auftraggeber: TU München, Lehrstuhl f. Bauklimatik u. Haustechnik

April 2007

rev. 1.01

Zusammenfassung

Aufbauend auf eine vorangegangene Simulations-Studie werden in vier passiv klimatisierten bzw. Bauteil-aktivierten Gebäuden ausgewählte Räume raumakustisch untersucht, wobei ein Schwerpunkt Kommunikationsräume mit schallharter Decke sind. Mittels binauraler Raum-Impulsantworten werden die Raumeigenschaften gemessen und analysiert und bewertet.

In einer Simulations-Software werden die Räume nachgebildet. Simulations-Resultate werden mit Meßergebnissen verglichen, und sie werden genutzt um verbesserte Raum-Varianten zu untersuchen und um modifizierte Nutzungsarten virtuell zu 'erproben'. An Meß- und Simulations-Ergebnissen wird die Aussagekraft verschiedener Qualitätsmaße gezeigt. Sowohl aus der Simulation als auch aus den Messungen werden binaurale Hörproben abgeleitet und verglichen.

Die Ergebnisse zeigen anhand der gebauten Beispiele, daß sehr gute, mit passiver Klimatisierung bzw. Bauteilaktivierung verträgliche raumakustische Lösungen realisierbar sind, wenn geeignete raumakustische Maßnahmen getroffen werden. Andererseits wurden auch Räume mit unbefriedigender raumakustischer Qualität vorgefunden und für diese Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Die auralisierten Hörproben aus der Simulation erwiesen sich im Vergleich zu des Hörproben aus Messungen als hinreichend Realitäts-nah, um als Entscheidungshilfe in der Planung dienen zu können. Um die Auralisation auch als Planungshilfe für kleinere Bauprojekte nutzbar zu machen, wird die Einrichtung einer Hörproben-Datenbank angeregt.

Abstract

Starting from a previous simulation study in this project room acoustic quality of selected rooms in four passive cooled buildings was analyzed in detail. Emphasis was set on communication rooms with sound reflecting concrete ceilings. Measured binaural impulse responses were used for acoustic quality analysis.

In parallel results from room acoustic simulation were compared to the measurements. By simulation various acoustic improvements and effects of occupation were tested. Besides reverb times other ISO 3382 acoustic quality measures were applied to results from measurements and from simulation. From both measurements and simulation auralized speech samples were generated and compared to each other.

Results show that passive cooling can be matched well with room acoustic requirements. Improvements are suggested for some acoustically 'yet unfinished' rooms.

Auralized speech samples from simulation showed to be an appropriate decision support tool for architectural planning. Establishment of a public auralized sample database containing typical examples is suggested in order to make auralization available also to small and medium scaled and low budget building projects.

Inhalt

1. Einführung	7
1.1 Hintergrund	7
1.2 Ziele	7
1.3 Übersicht über die untersuchten Räume	9
2. Methodik und Vorgehensweise	10
2.1. Allgemeines	10
2.2. Messungen	11
2.2.1 Die Meßmethode	11
2.2.2 Die Meßanordnung	12
2.2.3 Der Meßvorgang	14
2.3. Simulation	16
2.4. Bewertungs-Kriterien	17
2.4.1. Nachhallzeiten	17
2.4.2 Übertragungsqualität	18
2.4.3 Weitere Kriterien	18
2.5. Auralisation	20
3. Raumakustisches Monitoring an gebauten Beispielen	22
3.1 Großer Besprechungsraum im BOB-Gebäude, Aachen	22
3.1.1 Beschreibung des Meßobjekts	22
3.1.2 Messungen im großen Besprechungsraum	24
3.1.3 Raumakustische Simulation zum großen Besprechungsraum	29
3.1.4 Auralisation des VIKA-Besprechungsraums	37
3.2 Hörsaal im Zentrum für Umweltbewußtes Bauen, Kassel	39
3.2.1 Beschreibung des Meßobjekts	39
3.2.2 Messungen im ZUB-Hörsaal	41
3.2.3 Raumakustische Simulation des ZUB-Hörsaals	46
3.2.4 Auralisation des ZUB-Hörsaals	50
3.3 Unterrichtsraum im Neubau der Gebhard-Müller-Schule in Biberach	51
3.3.1 Beschreibung des Meßobjekts	51
3.3.2 Messungen in einem repräsentativen Unterrichtsraum	53
3.3.3 Simulationen zum vermessenen Unterrichtsraum	56
3.3.4 Auralisation des Unterrichtsraums	64
3.4 Werkstatt und Speisesaal in den neuen Werkstätten für behinderte Menschen in Lindenberg / Allgäu	66
3.4.1 Beschreibung des Meßobjekts	66
3.4.2 Messungen in verschiedenen Räumen	67
3.4.4 Simulation der Räume	75
3.4.5 Auralisation der Räume	83

4.	Objekt-übergreifende Auswertung	85
4.1.	Planungs-Aspekte	85
4.1.1	<i>Sprach-Übertragungsqualität</i>	85
4.1.2	<i>Kommunikationsräume mit schallharter Decke</i>	85
4.1.3	<i>Konflikt bei Vollverglasung</i>	86
4.1.4	<i>Schallausbreitung im Raum</i>	86
4.1.5	<i>Räume mit Kommunikation im Nahbereich</i>	87
4.2.	Nutzen und Grenzen der Auralisation im Planungsprozeß	88
4.2.1	<i>Vergleich der 'gemessenen' und der 'simulierten' Auralisation</i>	88
4.2.2	<i>Anwendung der Auralisation als Planungsinstrument</i>	89
4.3	Konzept für eine Hörproben-Datenbank	91
4.3.1	<i>Zielsetzung für die Datenbank</i>	91
4.3.2	<i>Aufbau der Hörproben-Datenbank</i>	91
4.3.3	<i>Öffentliche Bereitstellung und Nutzung der Datenbank</i>	91
4.4	Personen im Raum	92
4.4.1	<i>Raumakustische Einflüsse der Personen</i>	92
4.4.2	<i>Messungen der Schallabsorption durch Personen</i>	92
4.4.3	<i>Personen in der Simulation</i>	93
5.	Resumé	94
5.1	Lösungen für Kommunikationsräume	94
5.2	Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Räume	95
5.3	Eignung und Grenzen der Berechnungsverfahren und Datenquellen	95
5.4	Auralisation als Planungshilfsmittel	96
5.5	Weitere Entwicklung	97
5.6	Dank	97
	Anhang	99
A 1	Hinweise zur Verwendung der Hörproben	99
A 2	Hörproben-Übersicht	100
A 3	Literatur und Quellen	104
A 4	Regeln für die raumakustische Planung - Checkliste	106
A 5	Daten der untersuchten Räume	108

1. Einführung

1.1 Hintergrund

In thermisch und energetisch optimierten Gebäuden ist es in der Regel notwendig, die Raumdecken als großflächige, thermisch speicherfähige Bauteile zu nutzen. Dazu darf das speicherfähige Material, meist Beton, maximal mit einer thermisch gut leitfähigen Putzschicht bedeckt sein, und muß ansonsten raumseitig offen zugänglich sein. Es entfällt also die Möglichkeit, eine abgehängte Decke zur akustischen Bedämpfung zu verwenden.

In einer vorangegangenen Simulations-Studie¹ wurden Lösungsansätze für Kommunikationsräume mit schallharter Decke aufgezeigt und mittels akustischer Simulation analysiert und bewertet. Den Simulationsergebnissen zufolge sind Lösungen möglich, die eine sehr gute raumakustische Qualität ergeben und zugleich mit einer passiven Klimatisierung oder Bauteil-Aktivierung verträglich sind.

1.2 Ziele

Ziel dieses Vorhabens ist es, an gebauten Beispielen des EnOB-Programms realisierte raumakustische Lösungen, die mit passiver Klimatisierung und thermischer Bauteilaktivierung verträglich sind, zu untersuchen und die Wirksamkeit der akustischen Maßnahmen sowohl mittels Simulation als auch meßtechnisch zu überprüfen.

Die Lösungen für die zu untersuchenden Objekte sollen sowohl raumakustischen als auch thermischen Kriterien genügen. Da die an dem Monitoring-Programm teilnehmenden Gebäude nach energetischen Kriterien ausgewählt, in der Planung energetisch optimiert und an anderer Stelle detailliert energetisch und thermisch untersucht werden, soll der Schwerpunkt dieser Studie auf den raumakustischen Eigenschaften liegen.

Für die einzelnen Räume sollen einige raumakustische Eigenschaften angestrebt werden:

- Die Nachhallzeit soll, der jeweiligen Raumnutzung angemessen, relativ kurz sein.
- Der Nachhall soll im Frequenzspektrum ausgeglichen sein.
- Die Sprachverständlichkeit soll sehr gut sein.
- Bei mehreren Gruppen im Raum soll die gegenseitige Störung gering sein.
- Lärmpegel sollen durch akustische Bedämpfung gesenkt werden.
- Die Wirksamkeit thermisch speicherfähiger Bauteile soll nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt werden. Insbesondere soll der thermische Strahlungsaustausch zwischen speicherfähigen Bauteilen und anderen Oberflächen im Raum nach Möglichkeit nicht durch akustische Maßnahmen behindert werden.

¹ [Hennings, 2002]

Aus dem Vergleich der Meß-Resultate der untersuchten Räume mit korrespondierenden Simulations-Ergebnissen sollen Aussagen über die Qualität und Eignung der Prognosen mittels Simulation abgeleitet werden.

Unter Anderem hat die vorangegangene Studie in den Simulationsergebnissen gezeigt, daß bei Varianten eines Raumes mit gleich großer äquivalenter Absorberfläche eine deutliche Abhängigkeit der Nachhallzeiten und anderer Qualitätsmaße von der Absorber-Anordnung an den Innenoberflächen auftrat. Wenn dies in ähnlichem Ausmaß an den gebauten Beispielen bestätigt werden kann, ergeben sich Konsequenzen für die raumakustische Auslegung und Berechnung von Kommunikationsräumen.

Damit die Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit gemessenen Resultaten an verschiedenen gebauten Beispielen geprüft werden kann, soll eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der Meß-Situation und dem jeweils zugehörigen Raum im Rechenmodell hergestellt werden.

Des weiteren soll in diesem Vorhaben, unabhängig von den zuvor beschriebenen Fragestellungen, der Tatsache Rechnung getragen werden, daß in Bauprojekten, die nicht wissenschaftlich begleitet werden, derzeit üblicherweise keine Simulations-Werkzeuge zur Verfügung stehen. Zu diesem Zweck sollen, aufbauend auf den Resultaten der Untersuchungen, nach Möglichkeit einfache Regeln für Planer aufgestellt werden. Diese sollen es erlauben, abhängig von der jeweils geplanten Nutzungsart, auch ohne Simulation gute raumakustische Lösungen anzunähern.

Zu den numerisch analysierten Räumen sollen jeweils synthetische binaurale Hörproben erzeugt werden, die einen auralen Eindruck der raumakustischen Eigenschaften verschiedener Lösungsvarianten des jeweiligen Raums erlauben und raumakustische Qualitäts-Unterscheide auch für Personen ohne akustischen Fachkenntnisse wahrnehmbar machen. Ergänzend sollen mit Hilfe eines Kunstkopf-Mikrofons 'gemessene' Hörproben erzeugt werden, und diese mit den Simulations-Hörproben verglichen werden.

1.3 Übersicht über die untersuchten Räume

Insgesamt wurden vier Objekte für die Analysen ausgewählt. Dabei lag der Schwerpunkt mit drei Objekten auf Räumen, die für Kommunikation genutzt werden, da hier eine gute raumakustische Qualität ein wichtiger Bestandteil der gesamten Nutzungsqualität ist.

Die Objekte sind im einzelnen (in der zeitlichen Reihenfolge der Messungen am Objekt):

- Das BOB-VIKA-Gebäude in Aachen, ein Bürobau mit ca. 2000 m² Nutzfläche. Das Gebäude ist mit einer Betonkerntemperierung ausgestattet, die zum Heizen und zum Kühlen verwendet wird. In diesem Gebäude wurde ein ca. 50 m² großer Besprechungs- und Vortragsraum ausgewählt.
- Das 'Zentrum für Umweltbewußtes Bauen' (ZUB) an der Universität Kassel. Das Gebäude dient neben der Nutzung als Institutsgebäude zugleich der experimentellen Erprobung verschiedener Varianten der passiven Klimatisierung und der Bauteil-Aktivierung im Vergleich. In diesem Gebäude wurde der Hörsaal raumakustisch untersucht.
- Die Gebhard-Müller-Schule im Berufsschulzentrum Biberach. Hier wurde ein Unterrichtsraum, der für die Mehrzahl der Räume in dem Gebäude repräsentativ ist, raumakustisch analysiert.
- Die 'Neuen Werkstätten für Behinderte' in Lindenberg, Allgäu. Die zusammenhängenden Gebäude bieten 140 Behinderten-Arbeitsplätze in den Werkstätten, 40 Büroplätze sowie eine Kantine mit Speisesaal und Küche und eine Hausmeisterwohnung. Die raumakustische Untersuchung war konzentriert auf eine Werkstatt-Halle. Zusätzlich erfolgten einzelne Messungen im Speisesaal und in einem Besprechungsraum.

Die Räume im BOB-VIKA-Gebäude und im ZUB Kassel waren zum Zeitpunkt der Auswahl noch nicht raumakustisch behandelt. In beiden Fällen bestand die Absicht einer nachträglichen raumakustischen Verbesserung. Dies hätte die Chance geboten, Messungen vor und nach einer raumakustischen Verbesserung durchzuführen und damit eine Möglichkeit die Prognosequalität von Berechnungs- und Simulationsmethoden anhand der Messungen zu überprüfen. Jedoch waren bei Abschluß der Projektarbeiten² die beabsichtigten Verbesserungen in beiden Objekten noch nicht ausgeführt. Für den Besprechungsraum im BOB-VIKA-Gebäude besteht eine konkrete Planung.

² Dezember 2006

2. Methodik und Vorgehensweise

2.1. Allgemeines

Die in den Messungen und Simulationen des Projektes eingesetzten Werkzeuge und Methoden sind primär an dem Ziel ausgerichtet, typische Nutzungs-Situationen der untersuchten Räume nachzubilden.

Dementsprechend werden typische Sprecher- und Hörer-Orte als Positionen der Schallquellen und Schallempfänger gewählt. Anders als meist in raumakustischen Messungen werden hier wird ein Lautsprecher mit gerichteter Abstrahlung anstelle eines Kugelstrahlers (Dodekaeder) als Schallquelle und Kunstkopf-Mikrofon statt Mikrofonen mit Kugel-Charakteristik als Schallempfänger eingesetzt. So werden die Richtcharakteristiken des menschlichen Hörens und Sprechens in den Messungen angenähert. Zudem kann die Räumlichkeit des Hörens einbezogen werden.

Die Messungen und parallelen Simulationen sollen soweit möglich miteinander vergleichbar sein. Deshalb war ein wichtiges Auswahlkriterium für Lautsprecher und Mikrofon, daß deren Richtcharakteristiken als Datensätze für die verwendete Simulations-Software verfügbar waren.

Das Erzeugen von Hörproben zu verschiedenen Varianten der Räume soll in die Untersuchungen einbezogen werden. Deshalb werden sowohl sowohl als Meß-Ergebnis als auch aus Simulationen binaurale Raum-Impulsantworten hergestellt, mit deren Hilfe aus den gleichen Hall- und Echo-freien Sprach-Proben Hörproben erzeugt werden können.

Die Messungen in allen Objekten erfolgten mit demselben Lautsprecher und demselben Mikrofon sowie mit gleicher Kalibrierung der Meßeinrichtung. Damit sind sowohl alle Messungen als auch alle Hörproben untereinander vergleichbar.

2.2. Messungen

2.2.1 Die Meßmethode

In jedem untersuchten Raum wurden Raum-Impulsantworten gemessen. In diesen ist die gesamte Übertragungscharakteristik des Raums bezüglich der jeweiligen Kombination von Schallquelle und Schallempfänger enthalten. Aus den Raum-Impulsantworten lassen sich verschiedene Maße für die Raumakustische Qualität, wie beispielsweise spektrale Nachhallzeiten, Klarheitsmaße, Schwerpunktzeiten, usw., mathematisch ableiten³.

Die Messung von Raum-Impulsantworten kann mit verschiedenen Methoden erfolgen:

1. Direkte Messung der Impulsantwort, wobei der Impuls mit einem Knallkörper (Schreckschußpistole, zerplatzender Ballon, bei kleinen Räumen auch Händeklatschen, o. ä.) erzeugt wird. Die Methode ist nur für schnelle Grob-Messungen geeignet, da sie anfällig für Störgeräusche ist, und die Eigenschaften der Schallquelle wenig bekannt und zum Teil nicht reproduzierbar sind.
2. Indirekte Messung der Impulsantwort mit einem Maximalfolgen-Signal, das über einen Lautsprecher abgestrahlt wird. Die Impulsantwort ergibt sich aus der (mathematischen) Faltung des übertragenen Signals mit der ursprünglichen Maximalfolge. Die Methode ist weniger störanfällig und liefert eine deutlich bessere Qualität der Meßergebnisse als direkte Messungen. Die Ergebnisse sind reproduzierbar und die Frequenz- und Richt-Charakteristik des Lautsprechers kann ermittelt werden.
3. Indirekte Messung der Impulsantwort mit einem gleitenden Sinus-Signal, das über einen Lautsprecher abgestrahlt wird. Die Impulsantwort ergibt sich aus der Faltung des übertragenen Signals mit einem inversen Gleit-Sinus. Die Methode ist ebenfalls wenig störanfällig und liefert hochwertige und reproduzierbare Resultate.

Nach Probe-Messungen mit beiden indirekten Methoden im Vergleich fiel die Wahl auf die Messung mit Gleit-Sinus, da diese Methode insgesamt die besten Ergebnisse lieferte.

Die Messungen wurden mit der Meß-Software 'Aurora' [Farina, 200x] auf einem Notebook-PC mit hochwertigem externem Audio-Interface durchgeführt. Die Software Aurora stellt alle für die Erzeugung der Meßsignale, die Rückfaltung zu Impulsantworten und die Berechnung von Qualitäts-Parametern nach ISO 3382 notwendigen Funktionen bereit.

³ Vgl. dazu [ISO 3382]

2.2.2 Die Meßanordnung

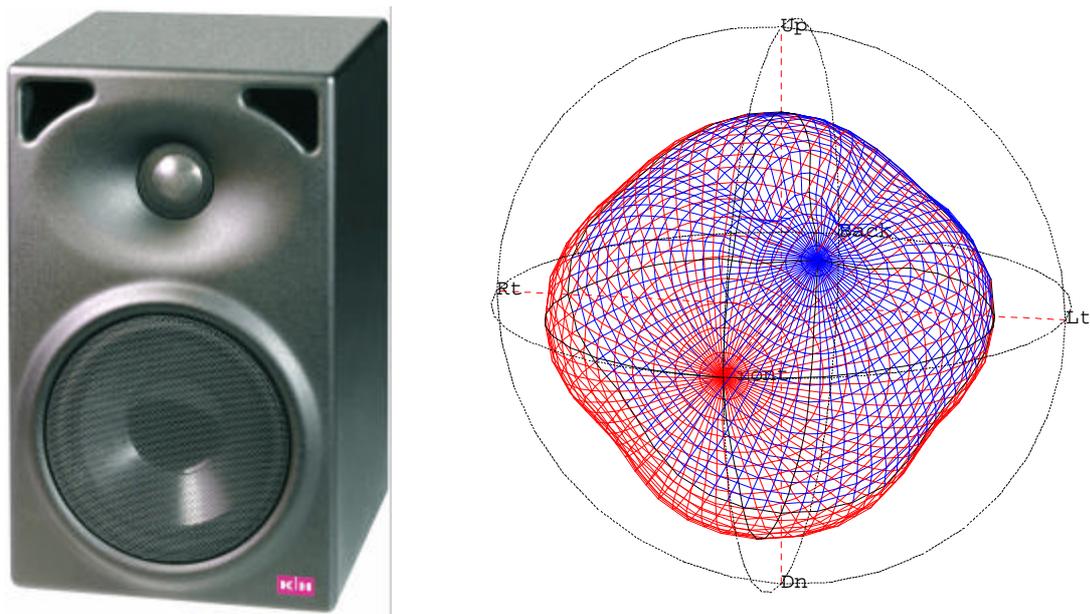
Für jeden vermessenen Raum wurden angepaßte räumliche Anordnungen von Schallquelle und Schallempfänger definiert, in denen typische Nutzungs-Situationen nachgebildet sind. So wird beispielsweise in einem Vortragsraum der Lautsprecher an typischen Positionen des Vortragenden und das Mikrophon an verschiedenen, über den Raum verteilten Hörerpositionen aufgestellt.

Schallquelle

Der als Schallquelle verwendete Lautsprecher sollte folgende Eigenschaften haben:

- ausgeglichener Frequenzgang im Sprache-relevanten Spektralbereich
- eine gerichtete Abstrahlung ähnlich einem menschlichen Sprecher
- bekannte Richtcharakteristik, so daß der Lautsprecher auch in der Simulation nachgebildet werden kann.

Die Wahl fiel auf einen kompakten Studio-Lautsprecher, der in seinen Abmessungen etwa der Größe eines menschlichen Kopfes entspricht. Die Bündelung des abgestrahlten Schalls ist etwas stärker als diejenige eines menschlichen Sprechers.



Grafik 2.2.1 Der als Schallquelle genutzte Lautsprecher vom Typ Klein + Hummel O-110
Im rechten Bild ist die dreidimensionale Richtcharakteristik bei 2 kHz dargestellt.

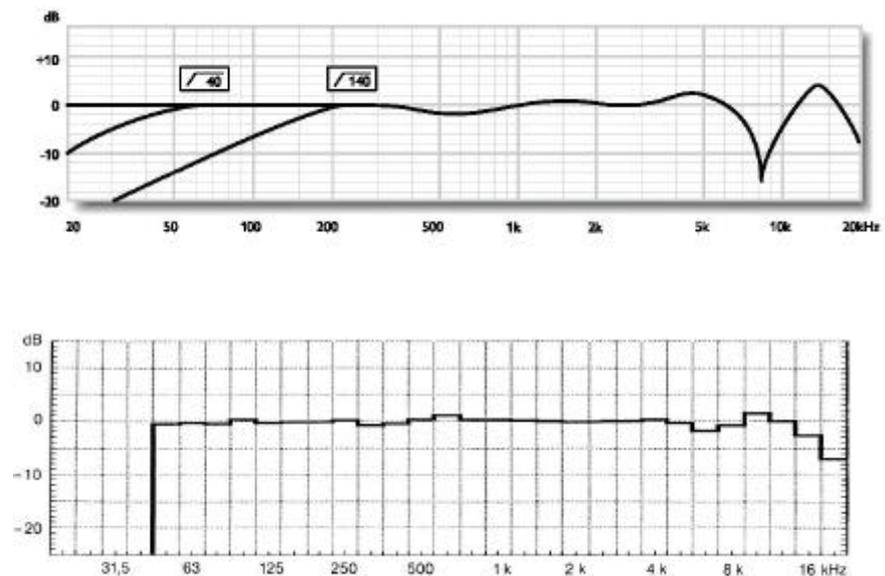
Bei Messungen wird der Lautsprecher an typischen Sprecherpositionen im Raum aufgestellt, wobei der Hochtöner etwa in Mundhöhe eines Sprechers angeordnet gebracht wird. Bei nachgestellten Vortrags-Situationen wird der Lautsprecher auf die Mitte der 'Zuhörerschaft', bei nachgestellten Gesprächs-Situationen auf das 'Gegenüber' ausgerichtet.

Mikrofon

Das Mikrofon für die Messungen sollte folgende Eigenschaften haben:

- ausgeglichener Frequenzgang im Sprache-relevanten Spektralbereich
- Binauraler Schallempfang mit einer Richtcharakteristik ähnlich dem menschlichen Gehör
- bekannte Richtcharakteristik, so daß das Mikrofon auch in der Simulation nachgebildet werden kann.

Als geeignet wurde ein Kunstkopf-Mikrofon mit Diffusfeld-Entzerrung⁴ ausgewählt. Die Diffusfeld-Entzerrung weist gegenüber auf eine bestimmte Einfallsrichtung bezogene Entzerrungen⁵ den Vorteil einer geringeren Empfindlichkeit für individuelle Streuungen auf, da die ausgeprägte frequenzabhängige Richtcharakteristik für verschiedene Köpfe stark variiert. Die Diffusfeld-Entzerrung bewirkt, daß die individuellen Streuungen im Klangbild weniger in Erscheinung treten.



Grafik 2.2.2 Das verwendete Kunstkopf-Mikrofon vom Typ Neumann KU-100.

Rechts oben der Freifeld-Frequenzgang bei Schalleinfall von vorne, rechts unten der Diffusfeld-Frequenzgang in Terzbändern von 40 Hz bis 20 kHz (Hersteller-Angaben).

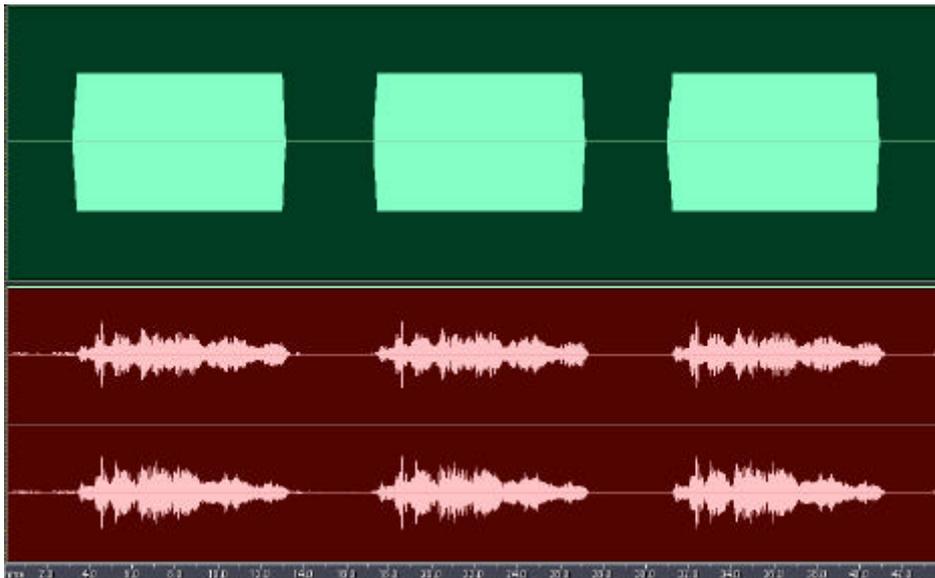
Das Kunstkopfmikrofon wird bei den Messungen auf einem Ständer an einer für die jeweilige Raumnutzungsart typischen Hörer-Kopfposition aufgestellt. Der Kopf wird dabei auf die Position eines Sprechers, eines 'Gegenüber' beim Gespräch oder eines 'Vortragenden' beim Vortrag, ausgerichtet.

⁴ Diffusfeld-Entzerrung bedeutet, daß das frequenzabhängige Übertragungsmaß (Frequenzgang) über alle Einfallsrichtungen gemittelt ausgeglichen ist.

⁵ Gängig sind bei Kunstkopf-Mikrofonen auch die Entzerrungs-Typen: 'front' (auf ein von vorne eintreffendes Signal bezogen) und 'plain' (auf ein seitlich einfallendes Signal bezogen) sowie Mischformen.

2.2.3 Der Meßvorgang

Bei einer Messung wird über den Lautsprecher ein von 60 Hz bis 20 kHz gleitender Sinuston (sinus sweep) abgestrahlt. Der Frequenzbereich wird in einem Zeitintervall von 10 s logarithmisch durchlaufen. Die untere Frequenz-Grenze des 'Sweeps' ist durch die Untergrenze des Frequenz-linearen Übertragungsbereichs des Lautsprechers bei 58 Hz bedingt. Die obere Frequenz-Grenze liegt oberhalb des Hörbereichs der meisten erwachsenen Menschen. Der Frequenzbereich schließt den gesamten Bereich menschlicher Sprache ein. Zugleich mit der Abstrahlung wird das durch den Raum übertragene und vom Kunstkopf-Mikrofon empfangene binaurale Signal aufgezeichnet.



Grafik 2.2.3 Amplituden-Bilder des bei einer Messung dreimal durchlaufenen Gleit-Sinus (oben) und des empfangenen binauralen Signals. Im empfangenen Signal ist die Frequenz-Charakteristik der Übertragung im Raum zu erkennen. Im gezeigten Beispiel ist der erste der drei Durchläufe mit Störschall 'verunreinigt'.

Das in der Messung übertragene Signal wird mit einem Zeit-invertierten Gleit-Sinus gefaltet, dem zusätzlich ein Amplitudengang aufgeprägt ist. Das Ergebnis der Faltung ist die Raum-Impulsantwort bezogen auf die Meßanordnung.

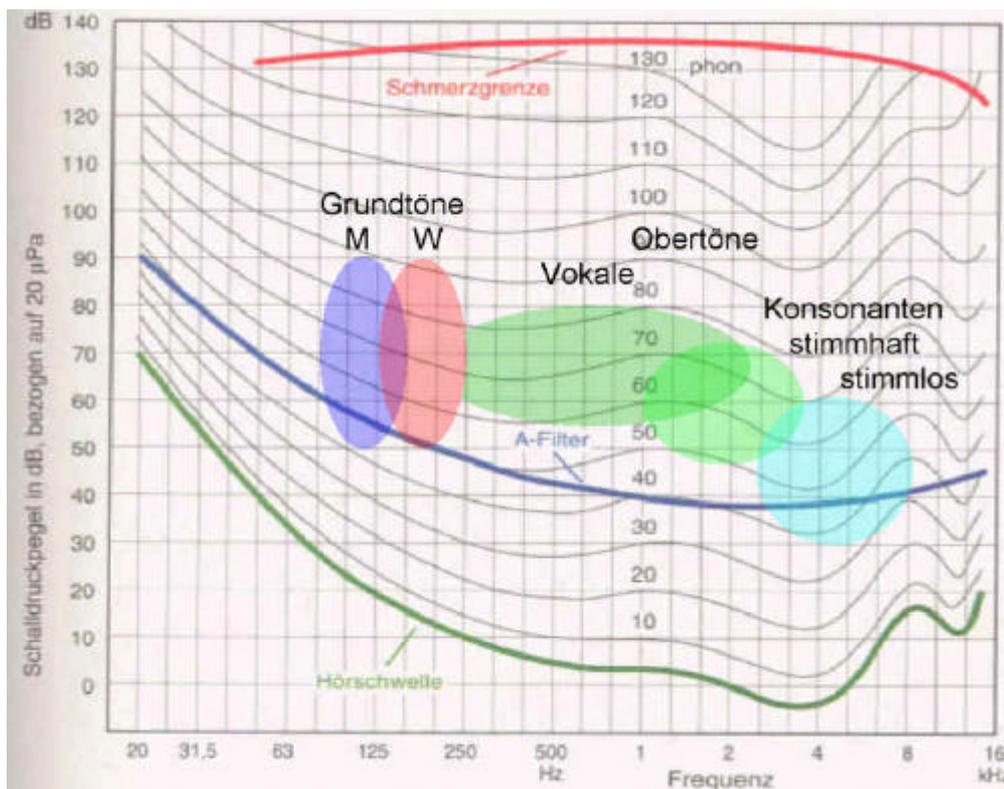
In weiteren Bearbeitungsschritten wird die Impulsantwort spektral in Oktavbänder zerlegt und für diese werden raumakustische Qualitätsmaße berechnet⁶. Von den verschiedenen Qualitätsmaßen werden hier vorwiegend die T_{30} -Nachhallzeit zur allgemeinen Bewertung des Raums und die Schwerpunktzeit zur Bewertung der besonderen Eigenschaften der jeweiligen Übertragungstrecke verwendet.

⁶ Die Algorithmen sind in [ISO 3382] beschrieben. Vgl. auch [Aurora].

Von den insgesamt zehn Oktavbändern im hörbaren Spektrum werden für die Bewertung raumakustischer Eigenschaften für Kommunikation in der Regel die sechs Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz Mittenfrequenz ausgewertet. Damit ist der für Sprache relevante Spektralbereich größtenteils abgedeckt. Lediglich die Grundtöne sehr tiefer Männerstimmen und hohe Anteile des Obertonspektrums stimmloser Konsonanten überschreiten den Bereich.

Oktavband	Untere Grenze	Mittenfrequenz	Obere Grenze
31 Hz	22.1 Hz	31.25 Hz	44.2 Hz
63 Hz	44.2 Hz	62.5 Hz	88.4 Hz
125 Hz	88.4 Hz	125. Hz	178. Hz
250 Hz	178. Hz	250. Hz	354. Hz
500 Hz	354. Hz	500. Hz	707. Hz
1 kHz	707. Hz	1000. Hz	1414. Hz
2 kHz	1414. Hz	2000. Hz	2828. Hz
4 kHz	2828. Hz	4000. Hz	5657. Hz
8 kHz	5657. Hz	8000. Hz	11314. Hz
16 kHz	11314. Hz	16000. Hz	22627. Hz

Tabelle 2.2.1 Die standardisierten Oktavbänder im hörbaren Spektralbereich.



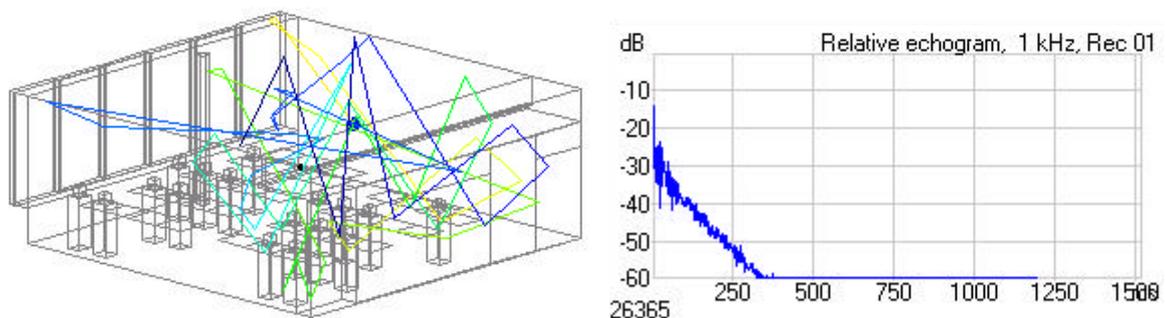
Grafik 2.2.4 Das menschliche Hörfeld mit den Kurven gleicher Lautstärke. Eingetragen sind typische Bereiche, in denen bei normaler Unterhaltung die Grund- und Obertöne menschlicher Sprache hörbar werden.

2.3. Simulation

Für die raumakustische Simulation wurde die Software CATT-Acoustic⁷ eingesetzt. Die Software arbeitet mit einer Kombination aus Spiegelquellen und 'Raytracing', also mit geometrischer Akustik. Einige Wellen-Effekte wie die Streuung an Kanten werden parametrisiert, Eigenschwingungen eines Raums können dagegen nicht nachgebildet werden.

Für einen zu simulierenden Raum wird ein Modell der Raumgeometrie erstellt, in dem neben allen Umschließungsflächen auch die größeren Objekte im Raum nachgebildet werden. Die Oberflächen werden mit Schallabsorptionsgraden und ggf. auch mit Streukoeffizienten belegt. Kleinteilige Objekte im Raum werden 'parametrisiert', indem sie in den Absorptions- und Streu-Eigenschaften der größeren Objekte oder Flächen berücksichtigt werden. Beispielsweise werden Gegenstände in einem Regal durch erhöhte Absorption und erhöhte Streukoeffizienten des Regals berücksichtigt.

Neben der Geometrie benötigt die Simulations-Software Absorptions- und Streu-Koeffizienten aller modellierten Oberflächen im Raum. Quellen der Absorptions-Daten sind die 'α-Datenbank' der PTB⁸ sowie Literatur- und Hersteller-Daten. In vielen Fällen liegen für die eingesetzten Oberflächen-Konstruktionen keine genau zutreffenden Datensätze vor, so daß es notwendig ist, mit interpolierten oder angenäherten Daten zu arbeiten. Die Streu-Koeffizienten sind in den meisten Fällen unbekannt, so daß fast immer plausible Schätzwerte zum Einsatz kommen. Die Software CATT-Acoustic erlaubt Standard-Streu-koeffizienten einzustellen, die für einzelne Oberflächen überschrieben werden können. Der Standardwert wurde für diese Untersuchungen auf 0.3 gesetzt. Stark strukturierte Oberflächen wurden mit erhöhten Werten bis 0.9 beschrieben.



Grafik 2.3.1 Darstellung des Simulations-Vorgangs in CATT-Acoustic; links ein einzelner vielfach reflektierter 'Schallstrahl' in einem Raum-Modell; rechts das bei der Simulation durch Überlagerung von 10^4 bis 10^6 'Schallstrahlen' entstehende 'Echogramm'. Die Anzahl der berechneten 'Schallstrahlen' ist ein Kompromiß aus Rechenzeit und Genauigkeit des Ergebnisses.

⁷ CATT-Acoustic wurde von Bengt-Inge Dalebäck in Zusammenarbeit mit der Universität Göteborg entwickelt und ist kommerziell erhältlich; vgl. [CATT, 2002].

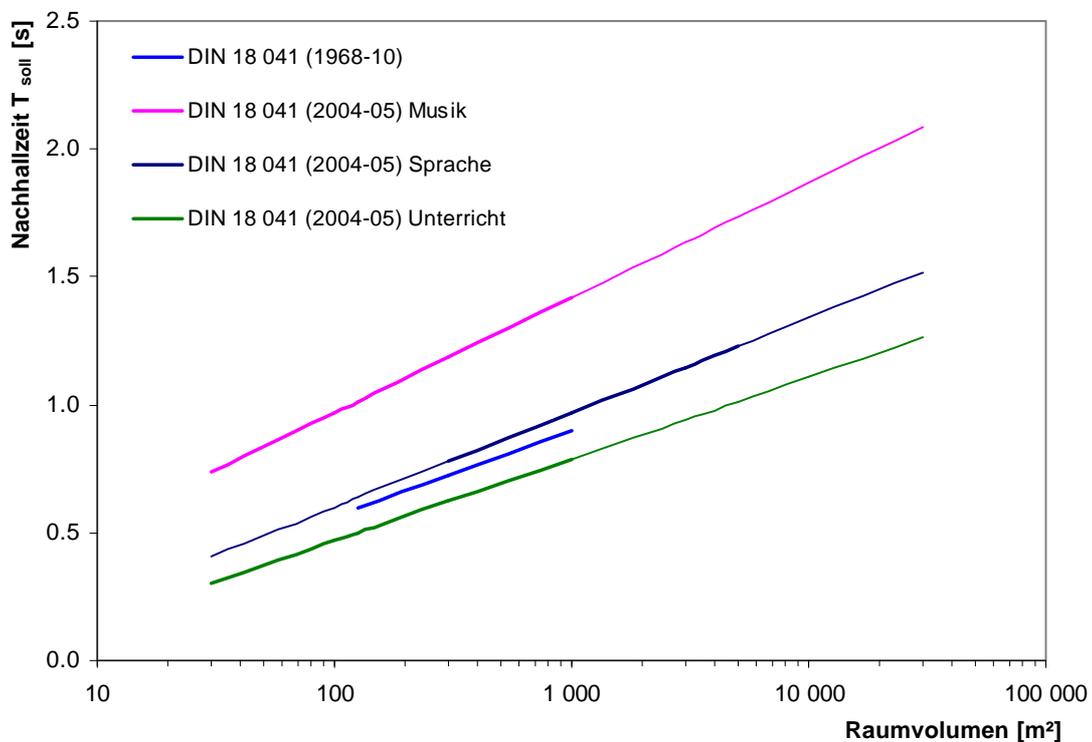
⁸ [PTB, 200x]

2.4. Bewertungskriterien

2.4.1. Nachhallzeiten

Das verbreitetste Qualitäts-Kriterium der Raumakustik ist die Nachhallzeit. Sie ist definiert als die Zeit, in der ein im Raum eingeschwungenes Schallsignal nach dem Abschalten um 60 dB abgeklungen ist. Eine direkte Messung erfordert eine Signaldynamik und einen Störabstand von jeweils größer als 60 dB, was in der Praxis oft nicht realisierbar ist. Deshalb werden meist T_{30} -Nachhallzeiten (Abklingen um 30 dB, Ergebnis mit Faktor 2 multipliziert) oder T_{20} -Nachhallzeiten (Abklingen um 20 dB, Ergebnis verdreifacht) gemessen. In diesen Untersuchungen werden T_{30} -Nachhallzeiten verwendet. Die Methoden zur Ableitung der Nachhallzeiten aus Meßergebnissen sind in ISO 3382 standardisiert.

Für die hier untersuchten Kommunikationsräume gelten die in DIN 18041 empfohlenen Nachhallzeiten. In der aktuellen Fassung (2004-05) werden unter anderem Empfehlungen für die Nutzungsarten 'Sprache' und 'Unterricht' gegeben. Die alte Fassung von 1968, die bei Planung der hier untersuchten Räume noch galt, enthält nur eine einheitliche Empfehlung für alle Nutzungsarten. Die empfohlenen Nachhallzeiten sind von der Raumgröße abhängig und stellen einen Kompromiß aus Übertragungsqualität, Raumantwort an den Sprecher, Rücksicht auf Personen mit eingeschränktem Hörvermögen und nicht zuletzt kulturell geprägten Hörerwartungen dar. Die DIN gibt einen Toleranzbereich von +/-20% vor, der bei tiefen und hohen Frequenzen teilweise erweitert ist.



Grafik 2.4.1 Empfohlene Nachhallzeiten der alten DIN 18041 und der neuen DIN 18041 für verschiedene Nutzungsarten in Abhängigkeit vom Raumvolumen, dünne Linien über den Kern-Anwendungsbereich hinaus extrapoliert.

2.4.2 Übertragungsqualität

Nachhallzeiten machen in erster Linie Aussagen über die Eigenschaften eines Raumes als Ganzes. Bezogen auf die Übertragungsqualität einer Übertragungstrecke, beispielsweise von einem Sprecher zu einem Hörer im Raum, ist die Aussagekraft der Nachhallzeit beschränkt. Genauere Information über die Übertragungsqualität liefern Maße, die zeitliche 'Verschmierung' des Signals auf der Übertragungstrecke beschreiben. 'Traditionell' wird hierfür bei Sprache die 'Deutlichkeit' D_{50} verwendet⁹. Darin werden die ab erster Wellenfront früh (maximal 50 ms verzögert) eintreffenden Energie-Anteile des Schalls in Relation zur gesamten Schall-Energie gesetzt. Darin steckt die Annahme, daß die früh eintreffenden Anteile die Übertragungsqualität verbessern, die spät Eintreffenden dagegen verschlechtern. Nachteilig an diesen Maßen ist, daß sie nur eine Schwelle zwischen 'früh' und 'spät' setzen, den Grad der 'Verspätung' aber nicht berücksichtigen.

Präziser in der Aussage ist hier die 'Schwerpunktzeit' (T_s), die dem 'ersten Moment' der zeitlichen Übertragungsfunktion¹⁰ entspricht. Anschaulicher ist das die Lage des zeitlichen 'Schwerpunkts' der Übertragung eines Impulses, bezogen auf die erste Wellenfront. In der Normung werden für Kommunikationsräume keine Anforderungen an die Schwerpunktzeit gestellt. In der Literatur wird für Sprache $T_s < 80$ ms gefordert¹¹. Nach Erfahrung des Autors ist eine gute Sprachübertragungs-Qualität etwa bei $T_s < 50$ ms gegeben. In dieser Untersuchung werden Schwerpunktzeiten als Maß für die Bewertung der Übertragungsqualität verwendet.

In der Literatur wird die Sprach-Übertragungsqualität teilweise mit STI oder RASTI, also nur einer Zahl bewertet. Diese Maße werden hier nicht eingesetzt, weil sie zwar eine Qualitäts-Aussage machen, aber anders als spektral aufgelöste Maße keinerlei Hinweise geben, in welchen Bereichen des Frequenzspektrums die Übertragungsqualität mit größter Aussicht auf Erfolg verbessert werden kann.

2.4.3 Weitere Kriterien

Schallpegel

Der Schallpegel spielt in zweierlei Hinsicht eine Rolle: In Kommunikationsräumen ist eine gleichmäßige Beschallung erwünscht, die Variation des Schallpegels über die Hörfläche im Raum soll so gering wie möglich sein. In Räumen mit Nahbereichs-Kommunikation und mit Lärmquellen ist dagegen die raumweite Schallausbreitung unerwünscht, der Schallpegel soll mit der Entfernung schnell abnehmen. Ohne Hindernisse im direkten Schallweg ist diese Abnahme auf etwa 6 dB pro Entfernungs-Verdopplung (wie im freien Schallfeld) begrenzt.

⁹ Äquivalent dazu ist der 'Früh-spät-Index' als 'Deutlichkeitsmaß' C_{50} . für Sprache oder in analoger Weise als 'Klarheitsmaß' C_{80} mit Schwelle bei 80 ms für Musik. Vgl. auch [ISO 3382]

¹⁰ genauer: der quadrierten, also auf Energie bezogenen Übertragungsfunktion.

¹¹ Siehe z.B. [Fasold, Veres, 1998]

Raum-Eigenfrequenzen

Räumen weisen im allgemeinen ein Spektrum von Eigenfrequenzen auf, die sich insbesondere zwischen zueinander parallelen Begrenzungsflächen ausbilden können. Sehr stark ausgeprägte Eigenschwingungen können in rechteckigen Räumen auftreten, wenn zwei oder alle drei Raumabmessungen in kleinen ganzzahligen Verhältnissen zueinander stehen. In solchen Fällen ist eine besonders gute Bedämpfung tiefer Frequenzen erforderlich, die vorzugsweise in Raum-Kanten oder Ecken erfolgen soll.

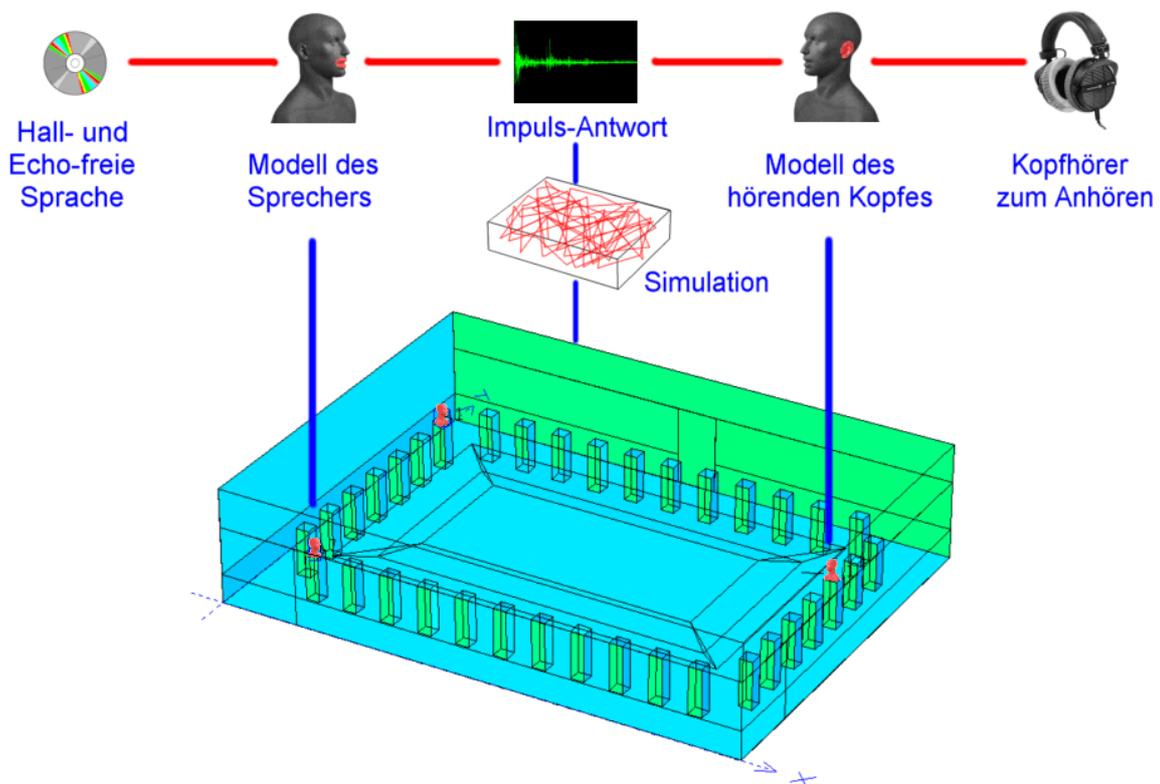
Raum-Eigenfrequenzen können auch Ursache von Diskrepanzen zwischen Resultaten aus Messungen und Simulations-Ergebnissen sein, da die derzeit gängige Simulations-Software Wellen-Phänomene wie Eigenschwingungen nicht abbilden kann.

Fokussierungen

Bei Räumen mit konkav gekrümmten Umschließungsflächen, wie Kuppeln, Kalotten, zylindrige Flächen, können Fokussierungen des Schalls entstehen, mit der Folge einer sehr ungleichmäßigen Verteilung der Schallenergie im Raum. Zusätzlich können in größeren Räumen Echos entstehen. Da in den hier untersuchten Räumen keine konkaven Oberflächen vorkommen, werden Fokussierungen nicht weiter betrachtet.

2.5. Auralisation

In der Auralisation werden die raumakustischen Eigenschaften auch außerhalb des betreffenden Raums hörbar gemacht. Ausgangsbasis der Auralisation ist eine im Raum gemessene oder aus einer Simulation des Raums gewonnene Impulsantwort, die einer Übertragungsstrecke im Raum entspricht. Diese Impulsantwort wird einer ohne jeglichen Raum-Einfluß aufgenommenen Sprach- oder Musik-Probe¹² aufgeprägt, in mathematischer Terminologie werden die beiden Signale der Sprach-/Musik-Probe und der Impulsantwort miteinander 'gefaltet'. In der Regel werden die Impulsantworten binaural hergestellt, so daß der Höreindruck über Kopfhörer Realitäts-nah wird.



Grafik 2.5.1 Die 'Zutaten' einer Auralisation mit Simulations-Ergebnissen. Die Übertragung im Raum, hier ein mit 36 Personen besetzter Konferenzraum, wird mit realistischen Modellen von Sprecher und Hörer simuliert. Die resultierende binaurale Impuls-Antwort wird mit Hall- und Echo-frei aufgenommener Sprache (mathematisch) 'gefaltet'. Das Ergebnis sind binaurale Hörproben, die über Kopfhörer angehört einen Realitäts-nahen Eindruck der Akustik des Raums hinterlassen. Anstelle der simulierten können auch binaural gemessene Raum-Impulsantworten verwendet werden.

¹² Für Forschungszwecke geeignete Sprach- und Musikproben stehen in [Archimedes, 1992] zur Verfügung.

In der Gebäude-Planung ist die Auralisation mittels Simulations interessant, da sie erlaubt in noch nicht gebaute Räume 'hineinzuhören' und so raumakustische Planungs-Alternativen auditiv zu vergleichen. Voraussetzung für die Eignung als Planungs-Instrument ist es, daß die simulierten Hörproben genügend gut mit der später gebauten Realität übereinstimmen. Um das zu erkunden, werden zu den hier untersuchten Räumen Hörproben sowohl aus gemessenen Impulsantworten als auch aus Simulations-Impulsantworten hergestellt, so daß ein direkter Vergleich möglich ist.

3. Raumakustisches Monitoring an gebauten Beispielen

3.1 Großer Besprechungsraum im BOB-Gebäude, Aachen

3.1.1 Beschreibung des Meßobjekts

Das BOB-VIKA-Gebäude in Aachen¹³ ist ein Bürobau mit etwa 2000 m² Nutzfläche. Das Gebäude ist mit einer Betonkerntemperierung ausgestattet, die zum Heizen und zum Kühlen verwendet wird. Bei der Auslegung des Gebäudes wurde angestrebt, daß die im Sommer in das Erdreich eingebrachte Wärmemenge und die im Winter entnommene Wärmemenge etwa gleich groß sind¹⁴, so daß über mehrere Jahre keine kontinuierliche Erwärmung oder Abkühlung erfolgt, die die Anlagen-Effizienz abnehmen lassen würde. Das Gebäude wurde 2002 fertiggestellt.



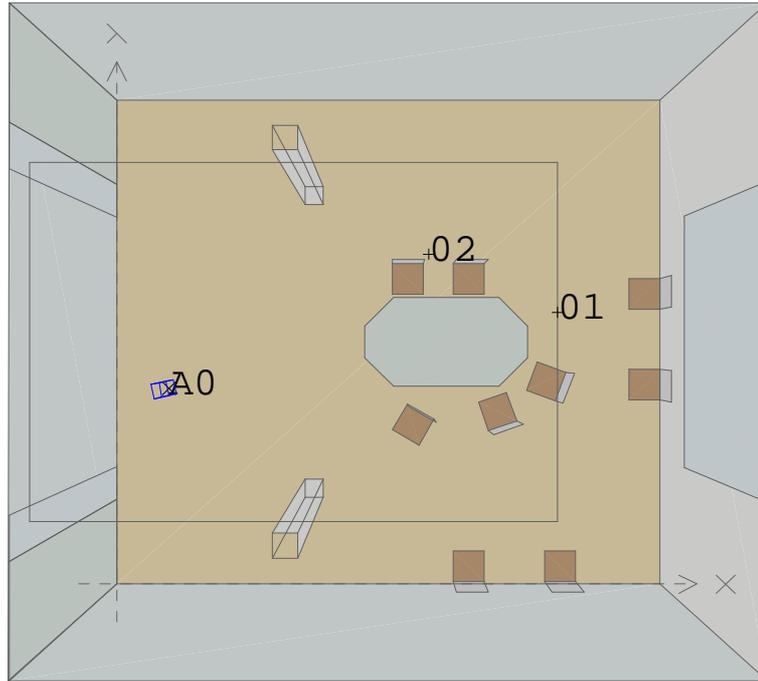
Grafik 3.1.1. Das BOB-VIKA-Gebäude in Aachen (Foto: VIKA / Jörg Hempel).

In diesem Gebäude wurde ein etwa 50 m² großer Besprechungs- und Vortragsraum als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Der Raum war zum Messungs-Zeitpunkt im April 2004 noch nicht raumakustisch behandelt. Nach Auskunft der Betreiber waren Maßnahmen zur raumakustischen Verbesserung beabsichtigt. Daraus ergab sich das besondere Ziel, mit einem Vergleich von Messungen vorher und nachher die Wirkung der raumakustischen Maßnahmen zu quantifizieren und damit auch die Prognose-Qualität einer Simulation zu untersuchen. Bei Abschluß des raumakustischen Monitorings¹⁵ liegt zwar eine konkrete Planung für die Verbesserung vor, die jedoch noch nicht ausgeführt ist.

¹³ Siehe auch die Solarbau-Dokumentation in [BOB, 2004].

¹⁴ 'balanced', daher die Bezeichnung BOB (Balanced Office Building).

¹⁵ Stand Dezember 2006



Grafik 3.1.2. Perspektivische Aufsicht des Geometrie-Modells des Besprechungs-Raums, hier mit einer Sprecher-Position (A0) und zwei Hörer-Positinen (01 und 02).

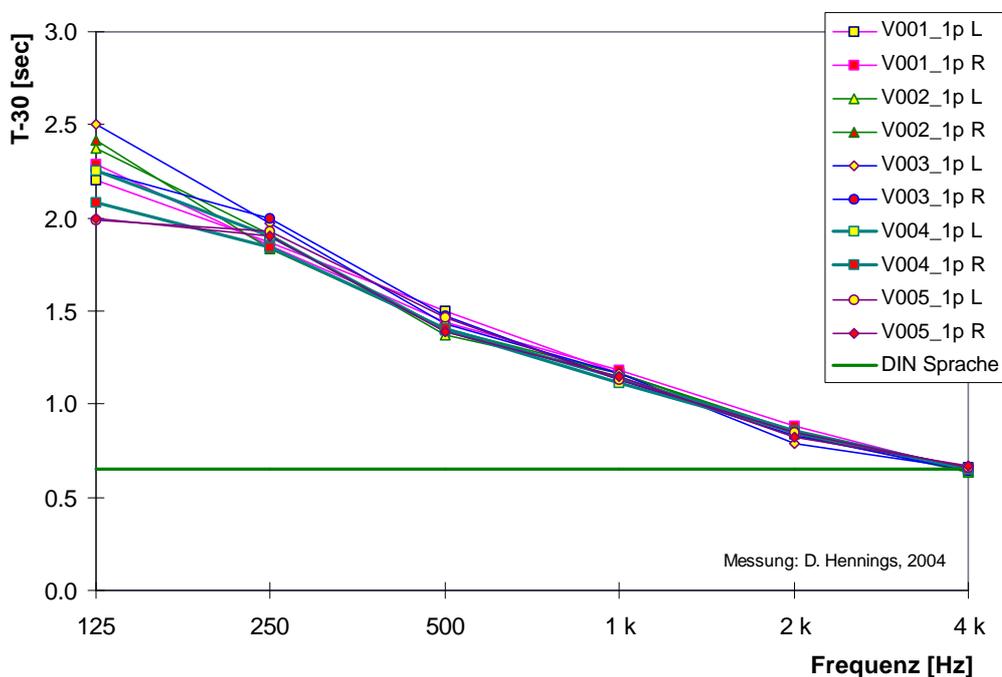


Grafik 3.1.3. Meß-Aufbau mit nachgestellter Besprechungs-Situation.

3.1.2. Messungen im großen Besprechungsraum

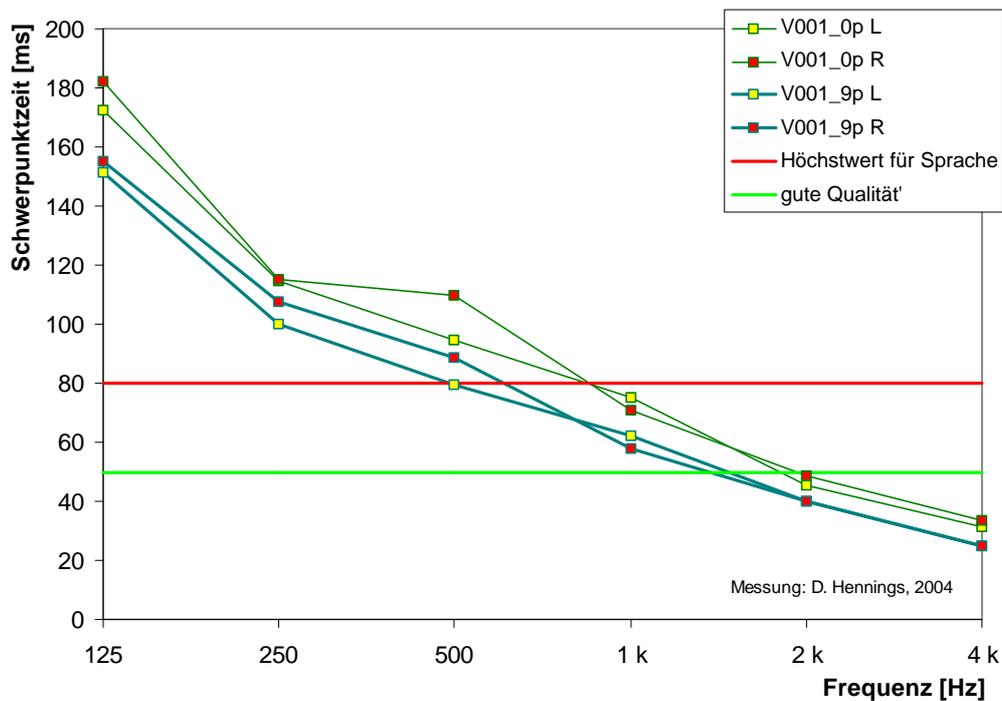
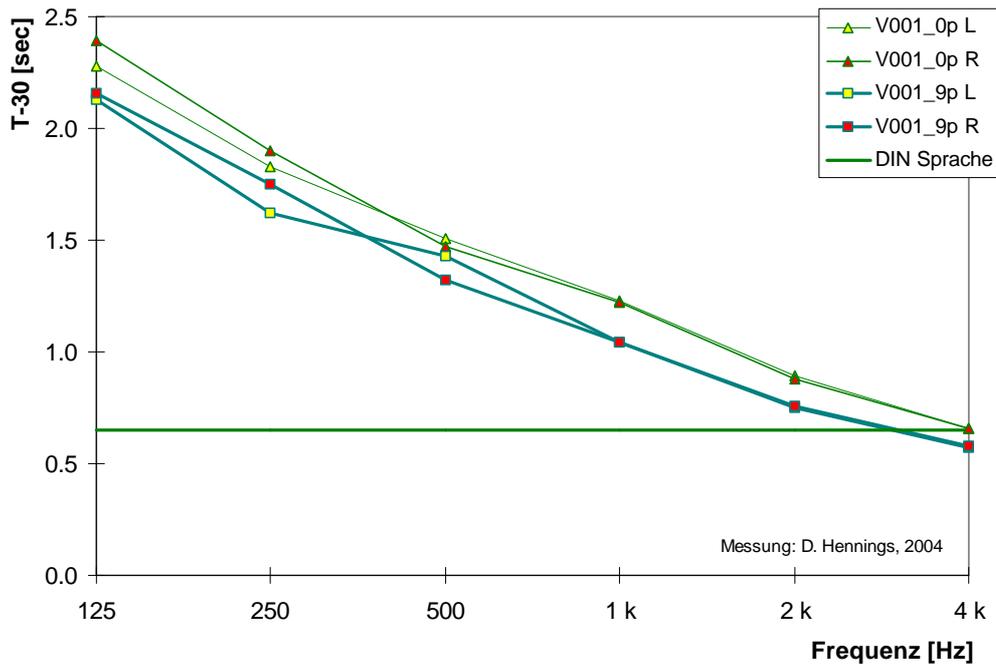
Der Raum wird vorwiegend für Besprechungen sowie für Vorträge und Präsentationen genutzt. Dem entsprechend wurden Vortrags-Situationen (stehender Sprecher, sitzende Hörer) und Besprechungs-Situationen (Sprecher und Hörer sitzend) in den Meßanordnungen nachgebildet.

Grafik 3.1.4 zeigt für 5 verschiedene Kombinationen aus Sprecher- und Hörer-Position die aus den gemessenen Raum-Impulsantworten abgeleiteten Nachhallzeiten. Mit Ausnahme des 125 Hz-Oktavbandes liegen die Werte für alle Positionen eng beieinander. Unabhängig von den Positionen liegen die Nachhallzeiten außer bei hohen Frequenzen deutlich über der Empfehlung der DIN 18041 für Sprache. Das entspricht auch Äußerungen von Nutzern, die den Raum als 'viel zu hallig' einstufen.



Grafik 3.1.4 T-30- Nachhallzeiten aus gemessenen Raumimpulsantworten im Besprechungsraums für fünf verschieden Positions-Kombinationen von Schallquelle und Schallempfänger, jeweils mit einer Person (dem Experimentator) im Raum. Alle Messungen für den linken (L) und den rechten(R) Kanal des Mikrofons.

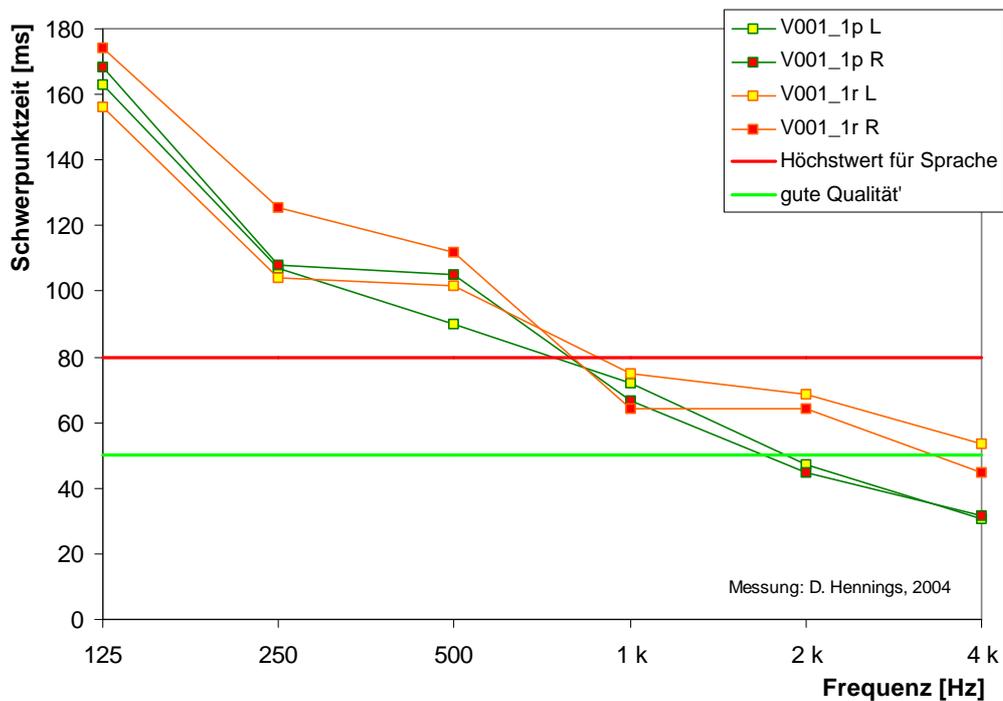
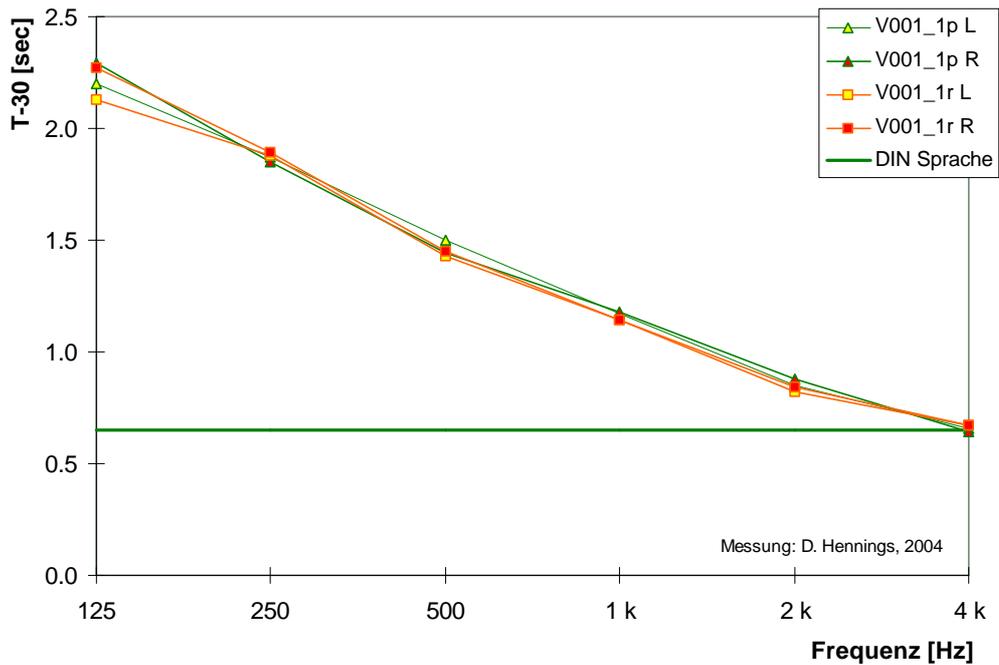
Neben dem Leeren Raum wurde auch der mit 9 Personen teilbesetzte Raum vermessen. Grafik 3.1.5 zeigt die Nachhallzeiten und die Schwerpunktzeiten für den teilbesetzten Raum im Vergleich zum leeren Raum. Die Reduktion der Nachhallzeit durch Personen im Raum in den Meßwerten merklich geringer ausfällt, als nach Literaturwerten zu erwarten wäre. Mit der Sabine'schen Formel wurden aus den Meßergebnissen äquivalente Absorberflächen der Personen errechnet und diese den Literaturwerten aus DIN 18041 und von Fasold gegenübergestellt (vgl. Grafik 3.1.7).



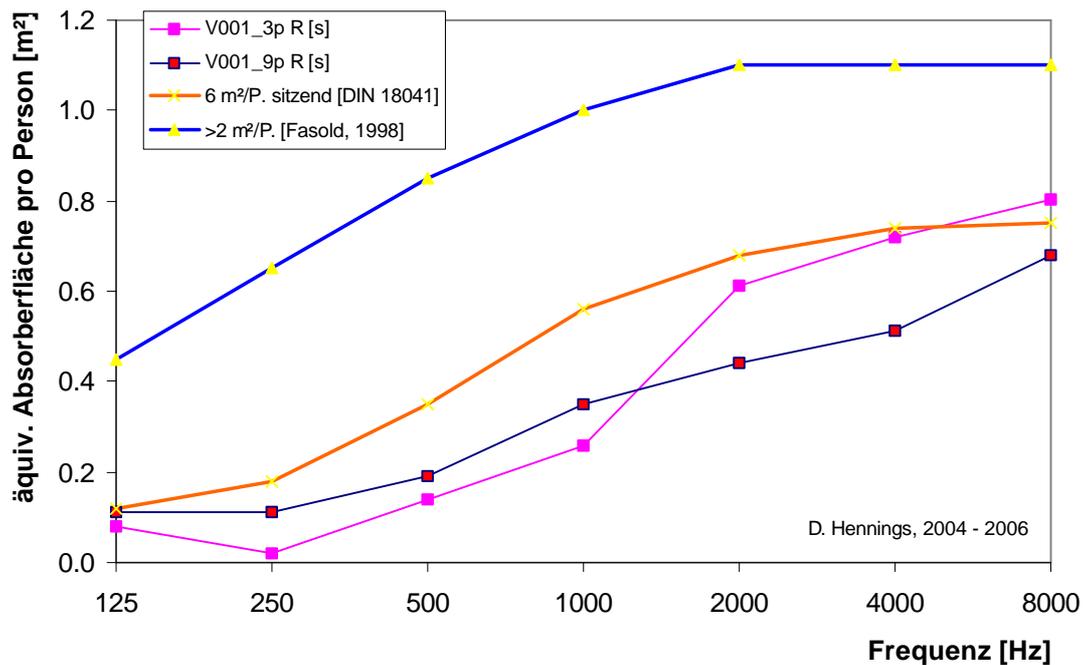
Grafik 3.1.5 T-30- Nachhallzeiten (oben) und Schwerpunktzeiten (unten) aus gemessenen Raumimpulsantworten im Besprechungsraums, mit 0 bzw. 9 Personen besetzt.

In weiteren Messungen wurde die Wirkung der Sprechrichtung des Sprechers auf die Sprachübertragung untersucht. Dazu wurde die in Vorträgen häufige Situation nachgebildet, daß der Sprecher sich beim Reden der Projektionswand zuwendet. In der Messung wurde dazu der Lautsprecher gegenüber der optimalen Sprechrichtung um 90° verdreht.

Die Meßergebnisse (Grafik 3.1.6) zeigen nahezu keinen Einfluß auf die Nachhallzeiten, jedoch einen merklichen Anstieg der Schwerpunktzeiten, was eine verringerte Sprachverständlichkeit bedeutet.



Grafik 3.1.6 Nachgebildete Vortragssituation mit Ausrichtung des 'Sprechers' auf die Hörer (p) sowie um 90° abgewandt (r). In den T-30-Nachhallzeiten (oben) ist nahezu keine Auswirkung erkennbar. In den Schwerpunktzeiten (unten) wird dagegen der Einfluß deutlich. Insgesamt zeigen die Meßergebnisse einen Bedarf nach wesentlich stärkerer Bedämpfung des Raums bei mittleren und besonders bei tiefen Frequenzen.



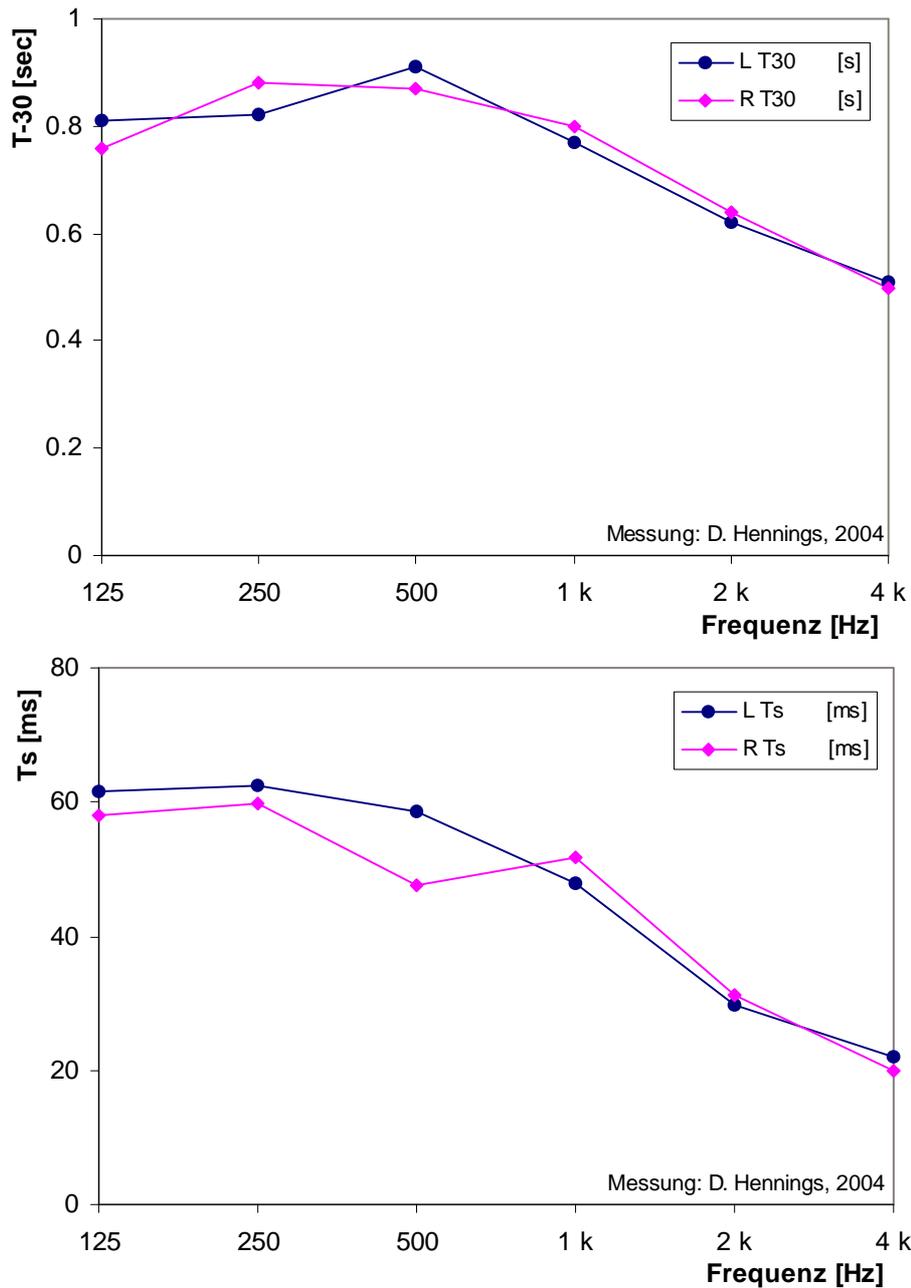
Grafik 3.1.7 Mit der Sabine'schen Formel aus den Meßergebnissen mit 3 und 9 Personen im Vergleich zum leeren Raum errechnete äquivalente Absorberflächen der Personen. Im Vergleich dazu Literaturwerte aus DIN 18041 und von Fasold.

Messung in einem 2-Personen-Bürraum

Zusätzlich wurde stichprobenartig in einem 2-Personen-Bürraum eine einzelne Raumpulsantwort gemessen (Grafik 3.1.8).

Die Nachhallzeiten sind für Büro-Nutzung akzeptabel. Obwohl die Nachhallzeiten oberhalb den empfohlenen Wert der DIN 18041 liegen¹⁶, äußern sich die Nutzer anders als beim Besprechungsraum zufrieden mit der raumakustischen Qualität. Das entspricht den gemessenen Schwerpunkzeiten, die durchweg unter 80 ms liegen und teilweise auch 50 ms deutlich unterschreiten. Dennoch wäre insbesondere unterhalb 2 kHz eine stärkere Bedämpfung des Raums günstig, beispielsweise durch zusätzliche offene Akten- oder Bücherregale und Plattenabsorber an den Seitenwänden.

¹⁶ Für das Raumvolumen von ca. 44 m³ empfiehlt die DIN 18041 (2004-05) für Sprache eine Nachhallzeit von 0.47 s (+/- 20%).



Grafik 3.1.8 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Nachhallzeiten eines Büroraums im Sprache-relevanten Spektralbereich. Sprecherposition an Schreibtisch 1 sitzend, Hörerposition an Schreibtisch 2 sitzend. Messung ohne reale Personen im Raum. Oben die T-30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten.

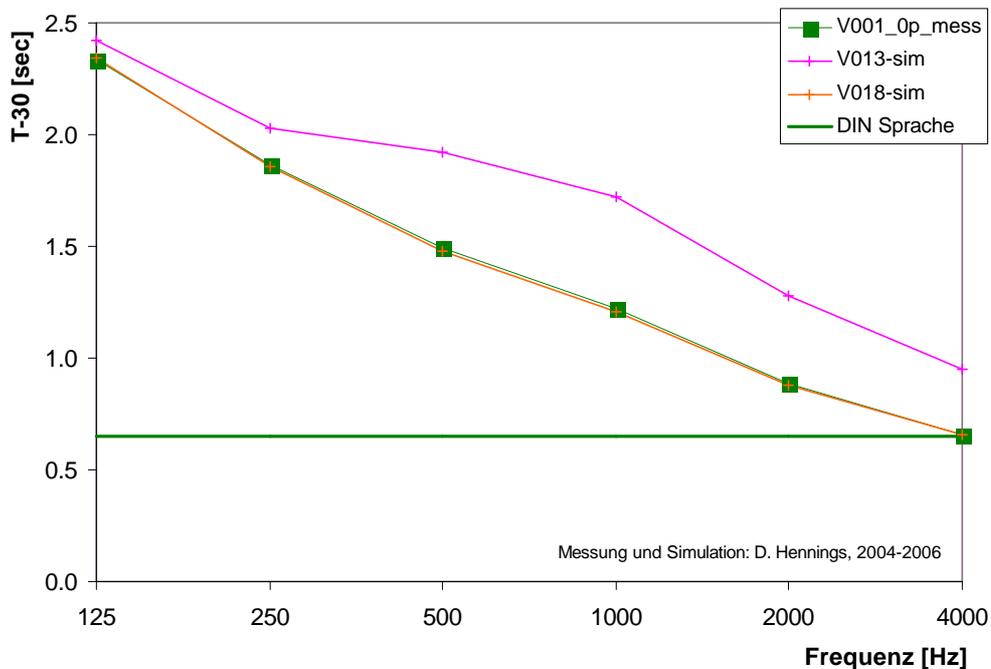
3.1.3 Raumakustische Simulation zum großen Besprechungsraum

Die Simulations-Untersuchungen des Raums bestehen aus zwei Abschnitten:

1. Adaption des Simulations-Modells an den Raum im gemessenen Zustand.
2. Simulation verbesserter Varianten.

Anpassung des Simulationsmodells an die Meßergebnisse

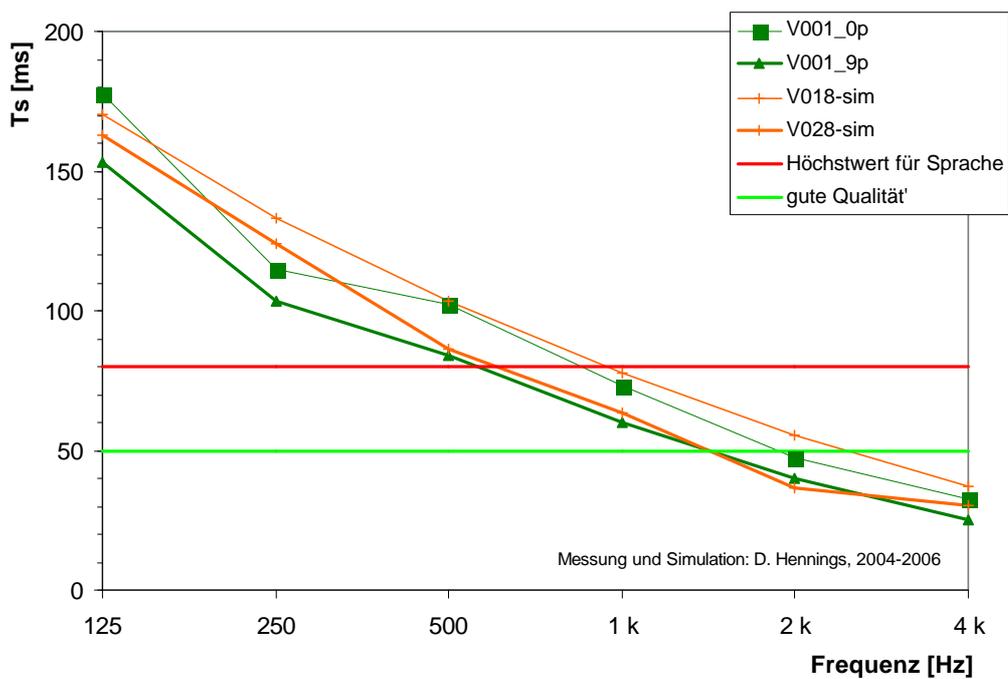
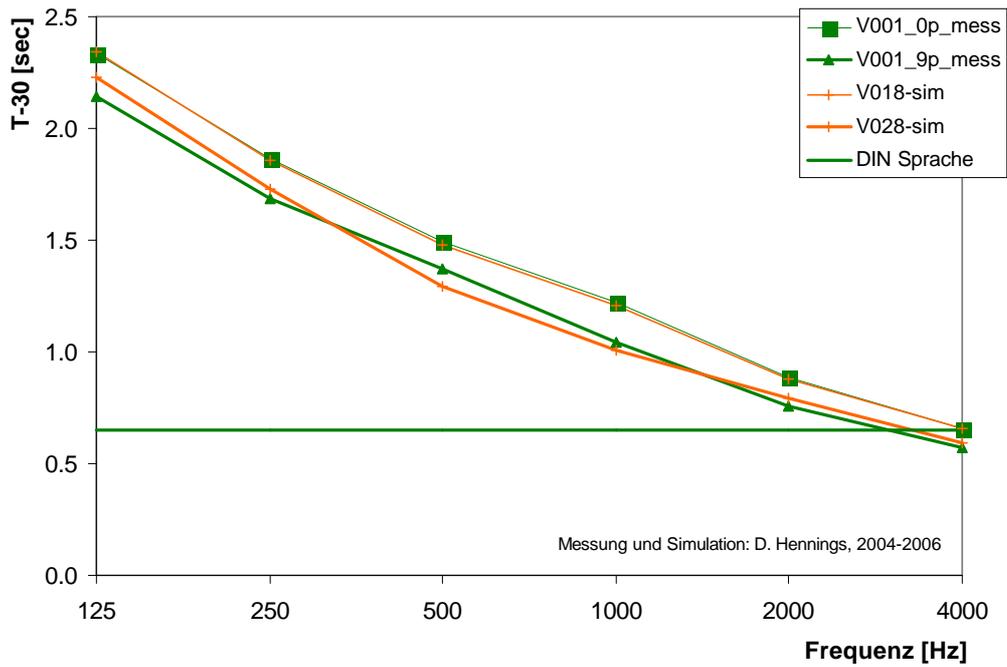
Das primäre Simulations-Modell soll die Ergebnisse der Messungen nachbilden. Für die im Raum verwendeten Oberflächen-Materialien und -Konstruktionen lagen keine Schallabsorptions-Daten vor. Deshalb wurden zunächst Näherungs-Werte aus der Literatur und der α -Datenbank der PTB¹⁷ verwendet ('V013-sim'). In 'V016-sim' und 'V018-sim' sind die Absorptionseigenschaften (auf physikalisch plausible Weise) so modifiziert, daß sich eine gute Übereinstimmung der T-30-Nachhallzeiten zwischen Messung und Simulation für alle Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz ergibt.



Grafik 3.1.9 Anpassung der Simulationsergebnisse an die Messungen: Die Grafik zeigt ein Meßergebnis (V001_0p) sowie die Resultate dreier simulierter Raumvarianten: Das initiale Simulationsmodell ('V013-sim') wurde mit Daten für die Oberflächen-Materialien und -Konstruktionen aus der Literatur und der α -Datenbank der PTB erstellt. In 'V018-sim' mit modifizierten Materialeigenschaften stimmen die T-30-Nachhallzeiten zwischen Messung und Simulation für alle Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz gut überein.

Das Simulationsmodell bildet auch die Wirkung von Personen im Raum recht gut nach, die entsprechend den äquivalenten Absorberflächen in DIN 18041 nachgebildet sind. Sowohl Nachhallzeiten als auch die Schwerpunktzeiten stimmen gut überein (Grafik. 3.1.10).

¹⁷ [PTB, 200x]



Grafik 3.1.10 Vergleich von Simulations- und Meß-Ergebnisse, jeweils für 0 und 9 Personen im Raum, angepaßtes Simulationsmodell, Personen angelehnt an DIN 18041 modelliert. Oben die T-30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten.

Die Simulation raumakustisch verbesserter Varianten

Ausgehend vom adaptierten Simulationsmodell (v018) wurden verschiedene raumakustisch verbesserte Varianten untersucht. Vorwiegend bedarf es in dem Raum einer akustischen Bedämpfung bei tiefen Frequenzen.

In Grafik 3.1.11 ist das Geometrie-Modell einer Variante dargestellt, in der tiefe Frequenzen mit Verbundplattenresonatoren (VPR) und mittlere Frequenzen mit mikroperforierten Absorbern bedämpft sind¹⁸. Die Verbundplattenresonatoren sind sehr effiziente Tiefen-Absorber, so daß der Flächenbedarf moderat ist. Zudem können die VPR wegen ihrer Metalloberfläche sowohl als Projektionsfläche als auch als Magnetwand genutzt werden. Mikroperforierte Absorber bewirken ergänzend eine zusätzliche Bedämpfung bei mittleren Frequenzen.

Grafik 3.1.12 zeigt die Ergebnisse des Simulations-Modells ohne Absorber, mit VPR-Absorbern alleine und mit VPR und mikroperforierten Absorbern. Die letztere Variante zeigt einen sehr ausgeglichenen Frequenzgang der Nachhallzeiten, die beim leeren Raum die DIN-Anforderung für Sprache noch etwas überschreiten, aber für Kommunikation gut geeignet ist. Nachteilig ist, daß die verwendeten Absorbertypen vergleichsweise hohe Kosten verursachen.

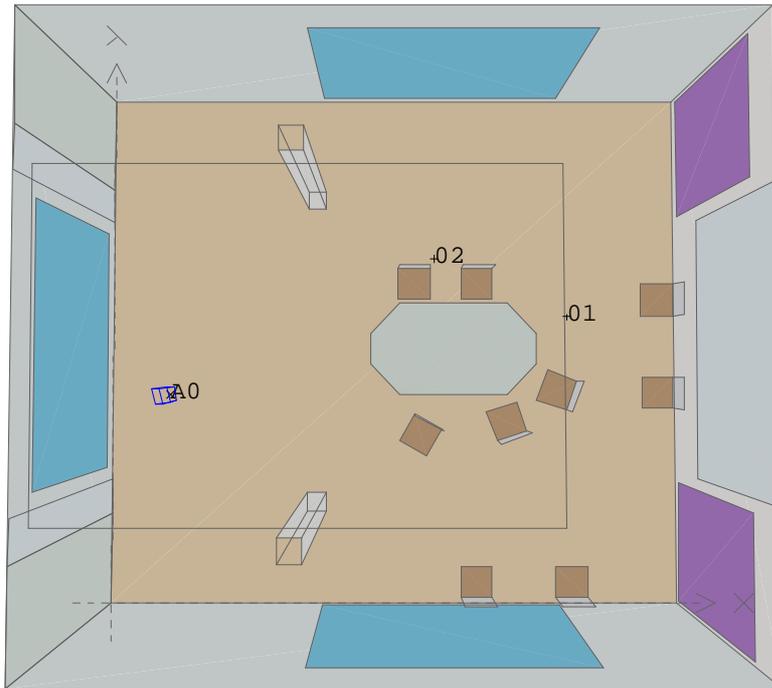
Als preisgünstigere Varianten wurden Lösungen mit konventionellen Plattenabsorbern untersucht. Wegen der geringeren Absorptionsgrade sind größere Flächen nötig als bei VPR-Absorbern.

Grafik 3.1.13 zeigt das Geometrie-Modell einer Variante mit Platten-Absorbern an den Seitenwänden, die auch als Pinwände verwendbar sind, und einem zusätzlichen Platten-Absorber an der Stirnwand, der auch als Projektionsfläche dient. Die Simulationsergebnisse sind für zwei unterschiedlichen Absorberflächen in Grafik 3.1.14 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine etwas geringere Wirkung als das vorherige Modell, aber dennoch eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand.

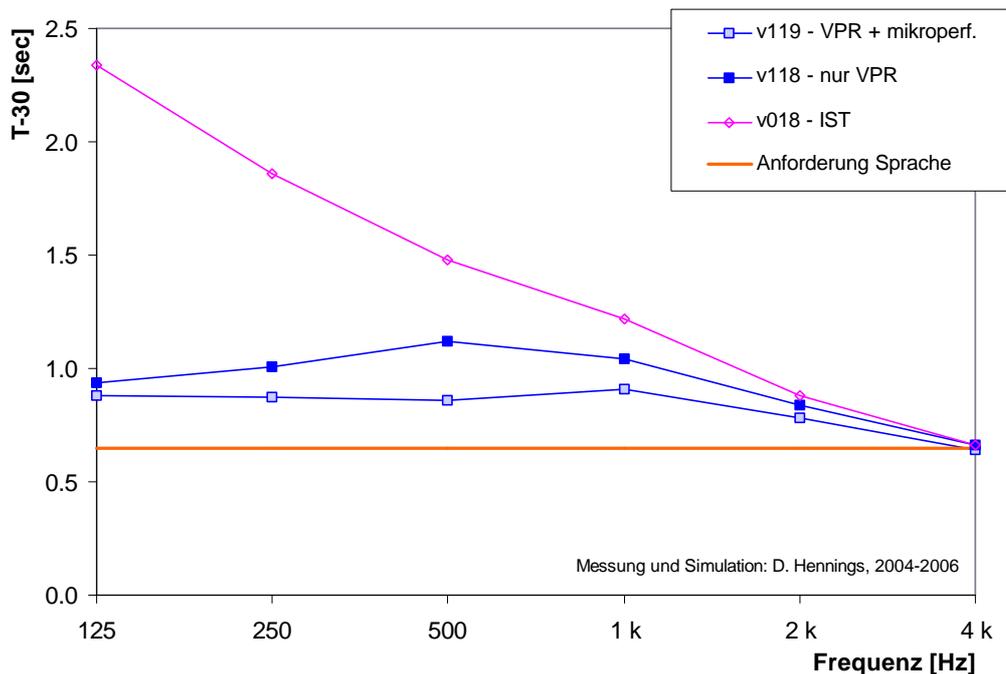
Nach Rücksprache mit dem Gebäude-Betreiber wurde das Modell modifiziert, insbesondere die Geometrie der Absorber wurde verändert. In Grafik 3.1.15 ist das veränderte Modell dargestellt. Grafik 3.1.16 zeigt die Simulationsergebnisse mit zwei unterschiedlichen Auslegungen der Plattenabsorber.

Es ist vorgesehen, den Raum analog zum letzteren Modell raumakustisch zu verbessern.

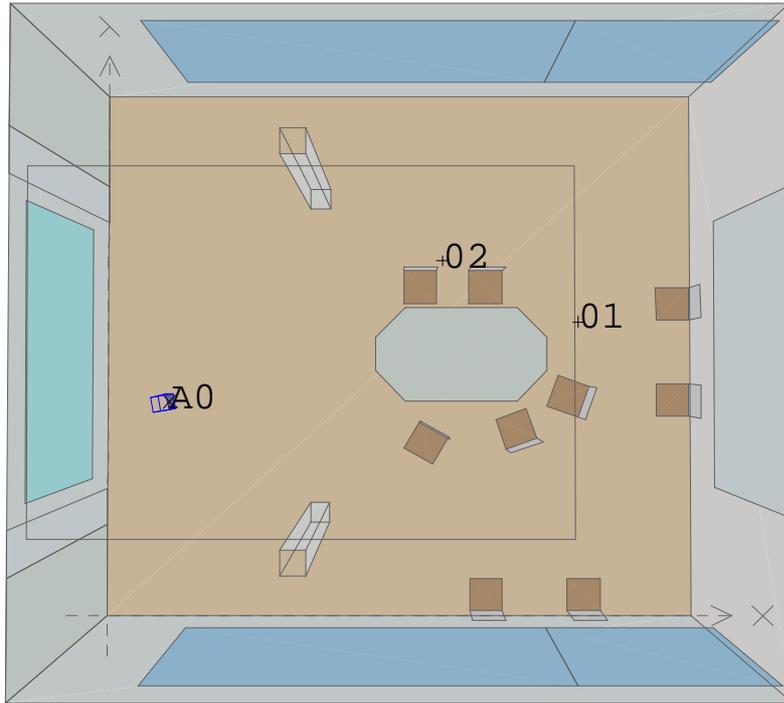
¹⁸ Zu diesen Absorbertypen vgl. [Fuchs, Zha, 1996] und [Fuchs, Zha, Schneider, 1997]



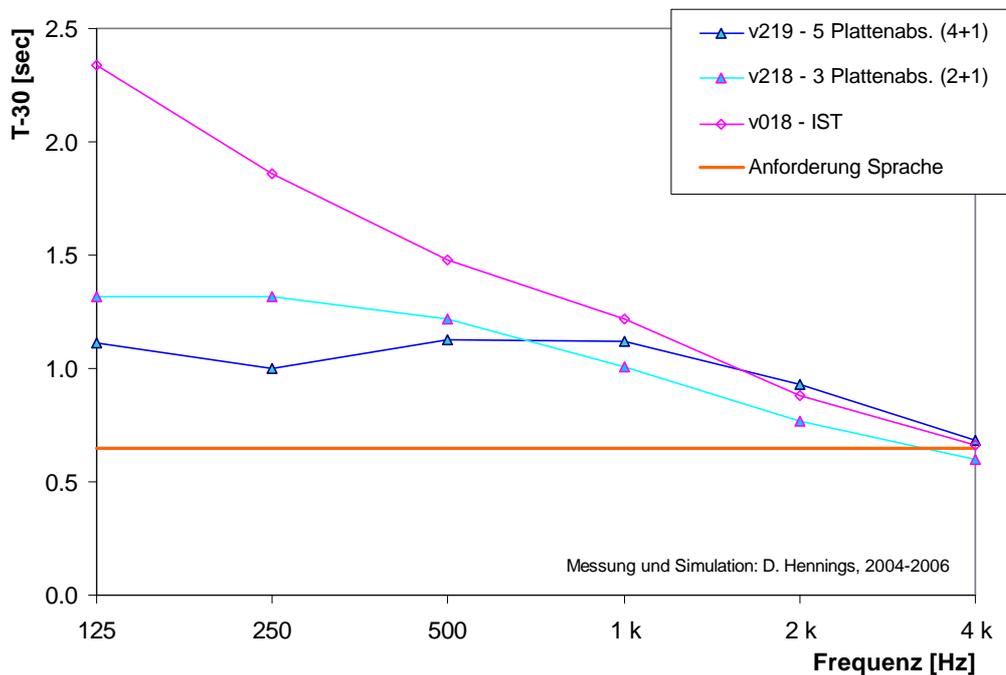
Grafik 3.1.11 Perspektivische Aufsicht des Geometrie-Modells der Raum-Variante mit VPR-Modulen an den Seitenwänden (türkis dargestellt) und mikroperforierten Absorbern an der Außenwand neben den Fenstern (violett).



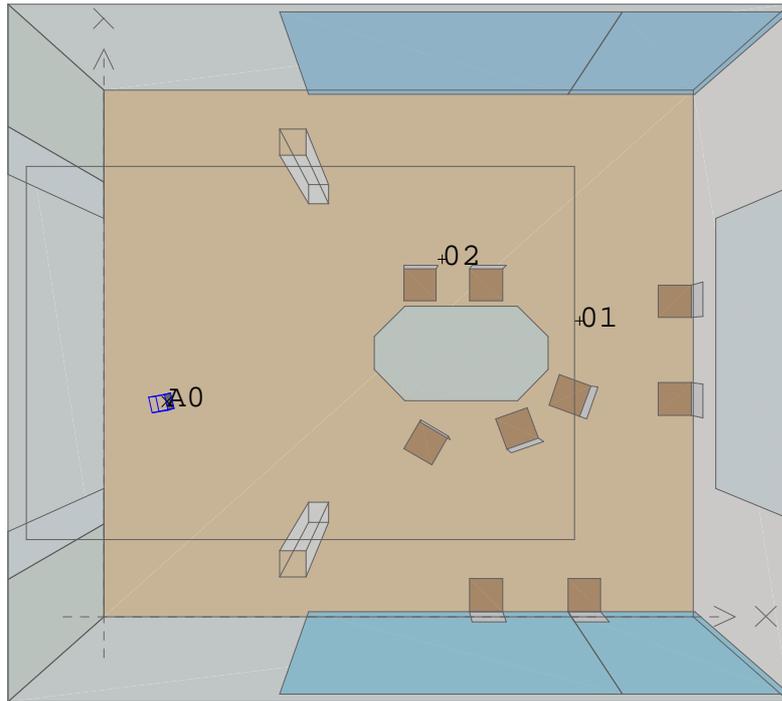
Grafik 3.1.12 Simulations-Ergebnisse (T_{-30}) zu zwei Raum-Varianten mit VPR-Modulen an den Seitenwänden und mikroperforierten Absorbern an der Außenwand neben den Fenstern. In V118 sind nur VPR-Module an Stirn- und Seitenwänden angebracht. In V119 sind zusätzlich mikroperforierte Absorber vor der Außenwand beidseitig neben dem Fenster montiert. Zum Vergleich die IST-Variante (V018) und die DIN-Anforderung für Sprache.



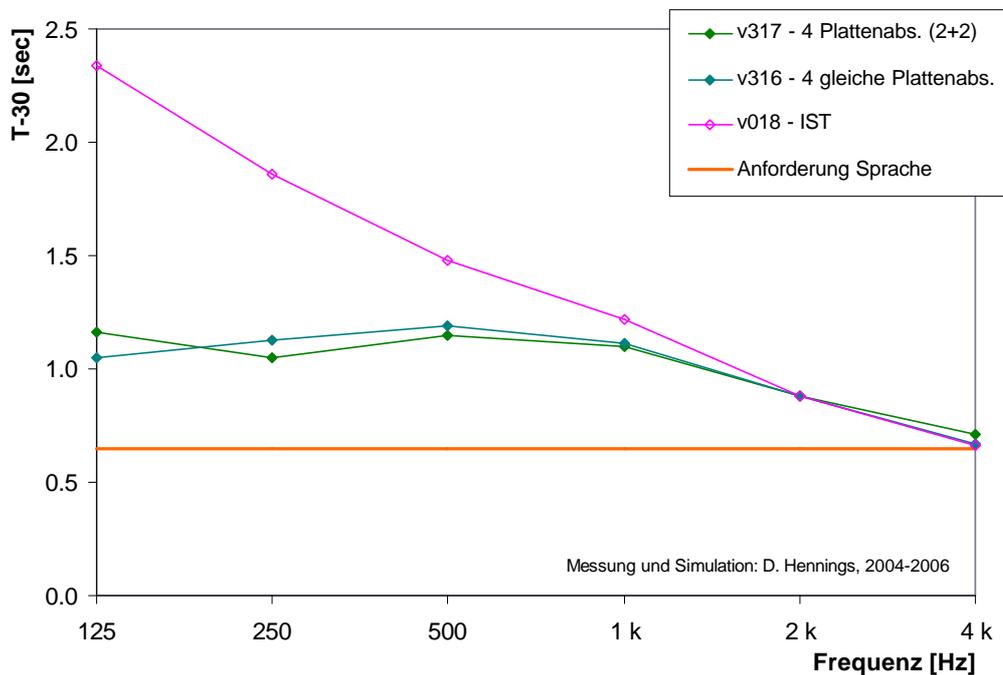
Grafik 3.1.13 Perspektivische Ansicht des Geometrie-Modells der Raum-Variante mit zwei verschiedenen Plattenabsorber-Typen. Typ 1 an der Stirnwand, auch als Projektionsfläche nutzbar. Typ 2 an den Seitenwänden, auch als Pinwand verwendbar.



Grafik 3.1.14 Simulations-Ergebnisse (T-30) zu zwei Raum-Varianten mit Plattenabsorbern an der Stirnwand und an den Seitenwänden. In V218 sind zwei kleinere Segmente weggelassen.

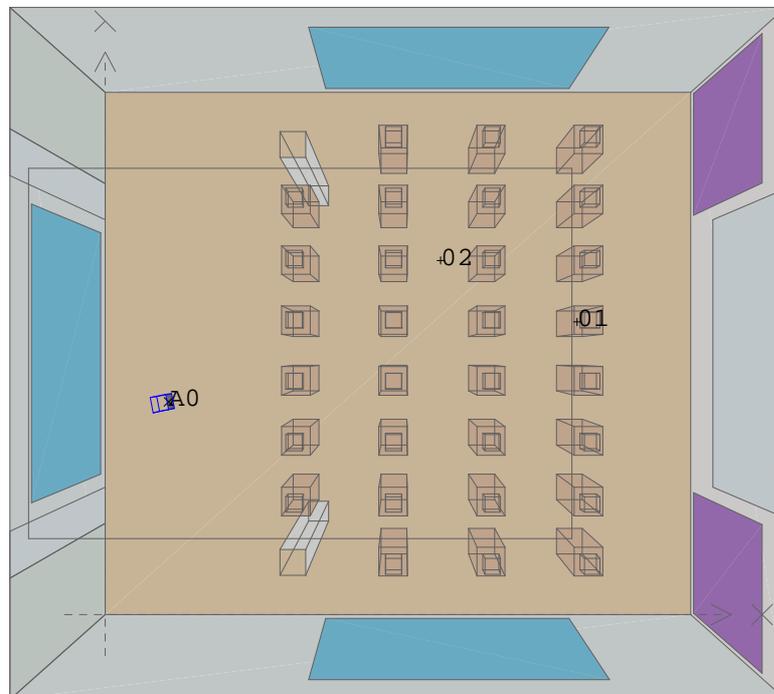


Grafik 3.1.15 Perspektivische Ansicht des Geometrie-Modells der Raum-Variante mit einer modifizierten Anordnung von Plattenabsorbern, die hier vom Boden bis zur Decke reichen. Durch die Teilung im Verhältnis 1:2 besteht die Möglichkeit, zwei Teilflächen mit unterschiedlich dimensionierten Absorbern auszustatten.



Grafik 3.1.16 Simulations-Ergebnisse (T_{-30}) zu zwei Raum-Varianten mit modifizierter Anordnung und neuer Dimensionierung von Plattenabsorbern In V317 sind zwei Teilflächen mit zwei unterschiedlich dimensionierten Plattenabsorber-Typen ausgestattet. In V316 ist die gesamte Absorberfläche mit einem einheitlichen dimensionierten Plattenabsorber-Typ versehen.

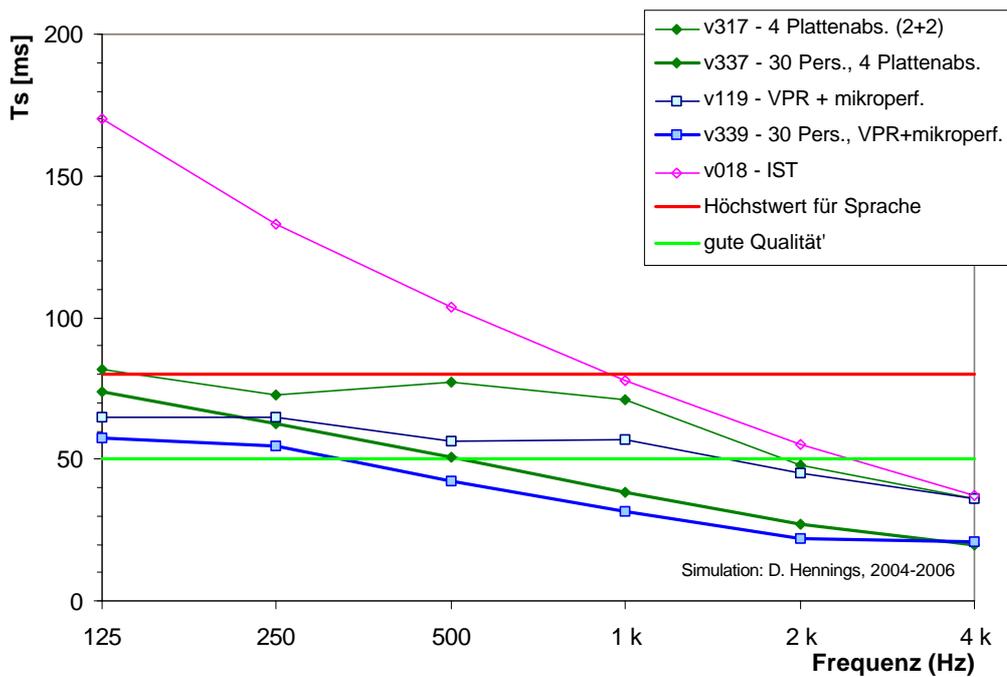
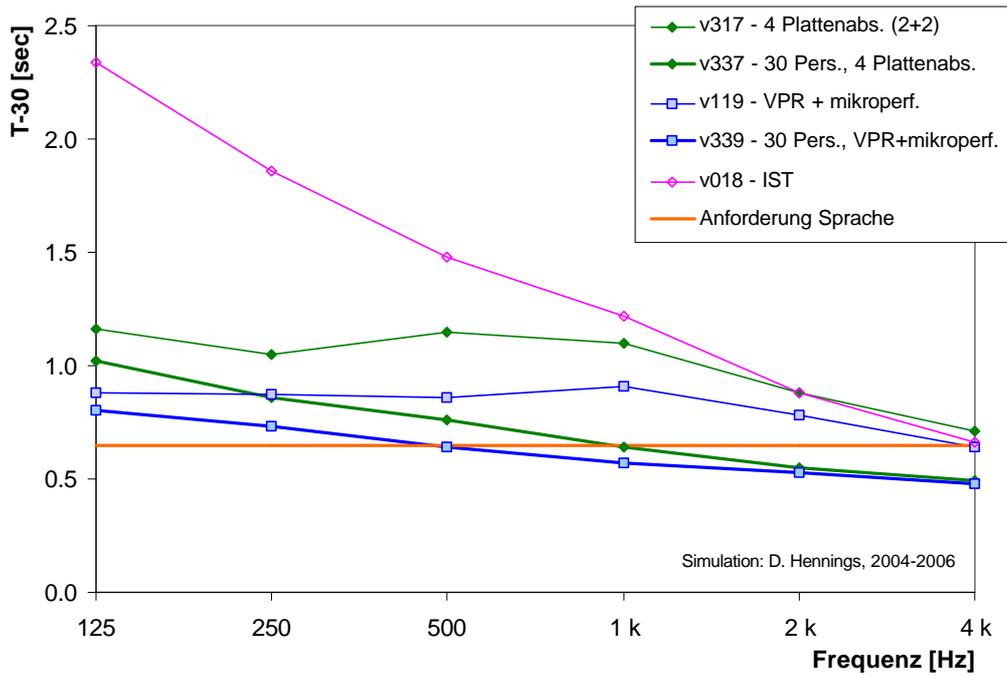
Die Nutzungs-Bandbreite des Raums reicht von kleinen Besprechungen bis zu Vortragsveranstaltungen. Die Eigenschaften des Raums mit wenigen Personen unterscheiden sich nicht wesentlich vom leeren Raum, wie auch die Messungen gezeigt haben. Stellvertretend für den voll besetzten Raum wurde in weiteren Simulations-Varianten Vortrags-Situationen mit 30 Personen¹⁹ nachgebildet.



Grafik 3.1.17 Das Geometrie-Modells des mit 30 Personenbesetzten Raums in perspektivischer Aufsicht, hier mit VPR-Modulen und mikroperforierten Absorbern ausgestattet.

Grafik 3.1.17 zeigt Simulationsergebnisse für zwei Raum-Varianten, mit Plattenabsorbern bzw. mit VPR und mikroperforierten Absorbern ausgestattet, sowohl leer als auch mit 30 Personen besetzt. Da Personen vorwiegend mittlere und hohe Frequenzen absorbieren, werden die Nachhallzeiten im voll besetzten Zustand sehr kurz. Die Ergebnisse lassen erwarten, daß beide Varianten sowohl bei schwacher, als auch bei voller Besetzung raumakustisch als Kommunikationsraum gut geeignet sind.

¹⁹ 30 Personen ist etwa die maximal sinnvolle Besetzung des Raums.



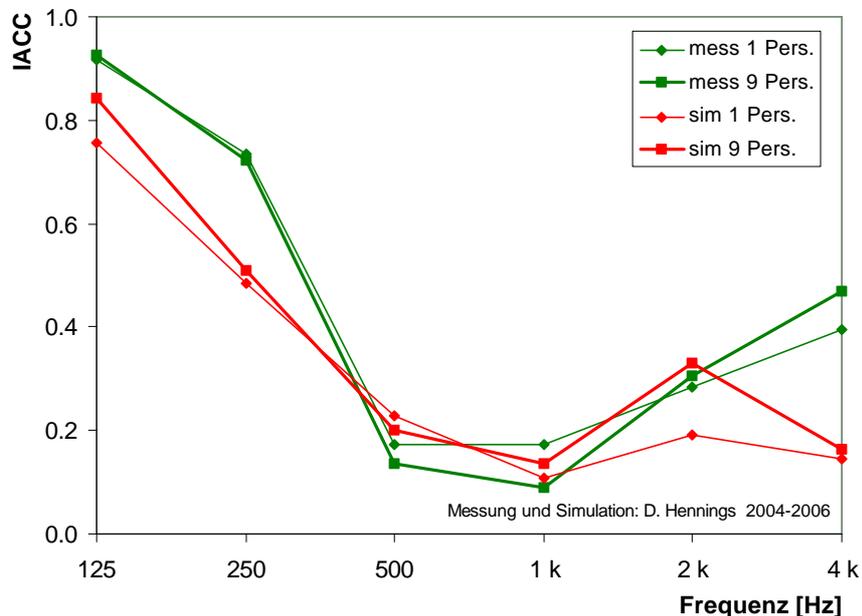
Grafik 3.1.18 Simulations-Ergebnisse, oben Nachhallzeiten (T_{-30} , unten) Schwerpunktzeiten (T_s) zu zwei Raum-Varianten, jeweils leer und mit 30 Personen besetzt. Die Nachhallzeiten und die Schwerpunktzeiten zeigen hier eine starke Korrelation, so daß einer der beiden Parameter zur Beurteilung ausreicht.

3.1.4 Auralisation des VIKA-Besprechungsraums

Für einen auditiven Vergleich wurden sowohl aus Meßergebnissen als auch zu mehreren simulierten Raum-Varianten Hörproben hergestellt.

Auralisation des IST-Zustandes

Die Simulations-Hörproben geben ebenso wie die Meß-Hörproben die Halligkeit und Tiefen-Betonung des Raums wieder. Es sind jedoch auch Unterschiede hörbar. So ist der Klang der Stimmen etwas unterschiedlich gefärbt. Zudem ist in den Simulations-Hörproben ein größerer Seitenschall-Anteil hörbar als in den Meß-Hörproben. Letzterem entsprechen auch Unterschiede zwischen den IACC-Werten²⁰ der entsprechenden binauralen Raum-Impulsantworten (vgl. Grafik 3.1.19).



Grafik 3.1.19 Beispielhafte IACC-Werte gemessener und simulierter Raumimpulsantworten.

Die in den IACC-Werten bei tiefen Frequenzen sichtbaren Unterschiede können durch Eigenschwingungen des Raums bedingt sein. Diese spielen in einem rechteckigen Raum mit weitgehend schallharten Wänden eine wichtige Rolle, und können in der Simulation nicht nachgebildet werden. Die Eigenschwingungen können eine stärkere Korrelation der Signale beider Ohren bewirken, als die Simulations-Software mit 'Raytracing' berechnet.

²⁰ Das Maß IACC (inter aural cross correlation) beschreibt den 'Räumlichkeits-Eindruck', der wesentlich von Seitenschall-Anteilen bestimmt wird; vgl. [ISO 3382]. Höhere IACC-Werte bedeuten (bei frontaler Schallquelle) weniger wahrnehmbaren Seitenschall.

Tab. 3.1.1 Einige Hörproben zum VIKA-Besprechungsraum²¹

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
1	VIKA-Besprechungsraum	IST, 0 P ²² . Vortrag, Hörer 1	mess
4	VIKA-Besprechungsraum	IST, 9 P. Vortrag, Hörer 1	mess
9	VIKA-Besprechungsraum	IST, 0 P. Vortrag, Hörer 1	sim
13	VIKA-Besprechungsraum	IST, 9 P. Vortrag, Hörer 1	sim
17	VIKA-Besprechungsraum	IST, 30 P. Vortrag, Hörer 1	sim
19	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., 0 P. Vortrag, H.1	sim
23	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., 30 P. Vortrag, H.1	sim
25	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., 0 P. Vortrag, Hörer 1	sim
29	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., 30 P. Vortrag, Hörer 1	sim

Auralisation simulierter Varianten

Simulierte Hörproben des Ist-Zustandes mit 30 Personen Besetzung zeigen infolge der zusätzlichen Absorption der Personen bei mittleren und hohen Frequenzen zwar eine annehmbare Bedämpfung des Raums, jedoch weiterhin eine Tiefen-Lastigkeit.

In den simulierten Hörproben der raumakustisch behandelten Varianten zeigt sich bei 30 Personen Besetzung eine sehr gute Sprachübertragung und auch ein spektral ausgeglichener Verlauf. Beim leeren (bzw. schwach besetzten) Raum liegt der Nachhall noch leicht über dem Optimum, ist jedoch ebenfalls deutlich verbessert. Die Variante mit Verbundplatten-Resonatoren (VPR) und mikroperforierten Absorbern zeigt insgesamt geringfügig bessere Ergebnisse als die preisgünstigere Variante, in der konventionelle Plattenabsorber zum Einsatz kommen.

²¹ Weitere Hörproben sind in der Übersicht in Anhang 2 aufgeführt. Die Nummern der Hörproben beziehen sich auf diese Übersicht.

²² Tatsächlich benötigt ein Vortrag selbstverständlich mindestens 2 Personen im Raum, jedoch werden die Eigenschaften in diesem Raum durch zwei Personen nur minimal beeinflusst.

3.2 Hörsaal im Zentrum für Umweltbewußtes Bauen, Kassel

3.2.1 Beschreibung des Meßobjekts

Der 2001 fertiggestellte Neubau des 'Zentrum für Umweltbewußtes Bauen' (ZUB) an der Universität Kassel ist einseitig an einen Backstein-Altbau aus dem 19. Jahrhundert angebaut. Das Gebäude ist als Stahlbeton-Skelett mit hochgedämmter Hülle ausgeführt. Das Gebäude dient neben der Nutzung als Institutsgebäude auch der Erprobung verschiedener Varianten der passiven Klimatisierung und der Bauteil-Aktivierung²³.



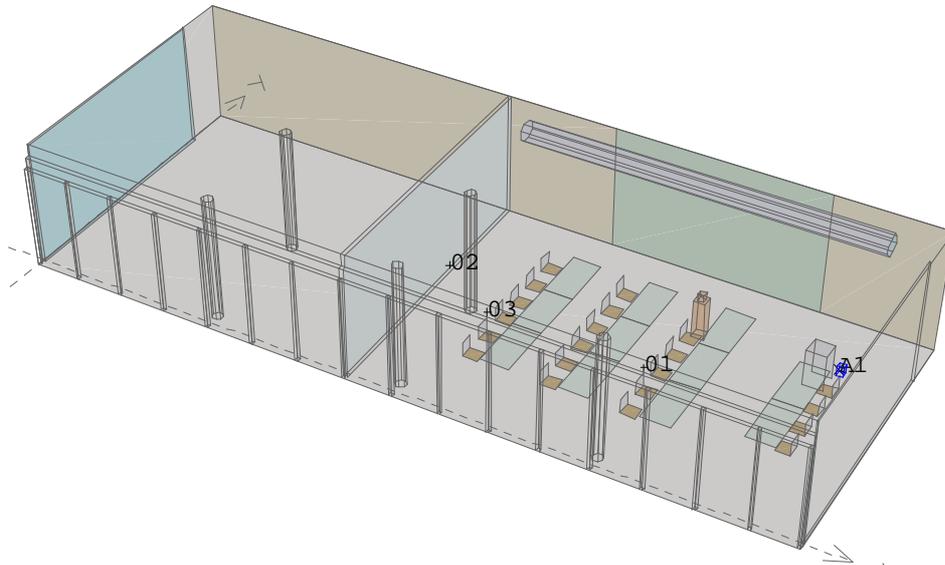
Grafik 3.2.1 Der ZUB-Neubau an der Universität Kassel mit seiner nahezu vollverglasten, nach SSO orientierten Fassade. Der vermessene kleine Hörsaal befindet sich im Erdgeschoß.

In diesem Gebäude wurde der Hörsaal raumakustisch untersucht. Der Raum ist in Längsrichtung teilbar. Für die Untersuchungen wurde die geteilte Variante und eine Möblierung gewählt, die der überwiegenden Nutzungsweise des Raums entspricht (vgl. Grafik 3.2.2).

Aufgrund des experimentellen Charakters auch des Hörsaals stehen wenig Oberflächen für raumakustische Maßnahmen zur Verfügung: Boden und Decke werden als thermisch aktivierte Bauteile genutzt. Der vollverglasten Fensterwand gegenüber ist eine aus ungebrannten Lehmziegeln gemauerte Versuchswand angeordnet. Die Ziegel der zweischaligen Wand sind teilweise mit offenen Fugen vermauert, so daß ein tiefe Frequenzen absorbierender Helmholz-Resonator entsteht. Die vordere Stirnwand ist als ebenfalls bei tie-

²³ Siehe auch die Solarbau-Dokumentation in [ZUB, 200x].

fen Frequenzen wirksamer Plattenabsorber ausgeführt²⁴. Hintere Stirnwand ist der mobile Raumteiler. Weitere vom Gebäudebetreiber beabsichtigte akustische Bedämpfungs-Maßnahmen sind noch nicht realisiert²⁵.



Grafik 3.2.2. Perspektivische Ansicht des Geometrie-Modells des ZUB-Hörsaals mit geschlossenem Raumteiler. In Messung und Simulation untersucht wurde der rechte, möblierte Teil.



Grafik 3.2.3 Die Lehmziegelwand im ZUB-Hörsaal, links mit geschlossenen Fugen, rechts mit offenen vertikalen Fugen als Helmholtzresonator ausgebildet..

²⁴ Absorberdaten lagen weder für den Plattenabsorber noch für die Lehmziegelwand vor.

²⁵ Stand Dezember 2006.

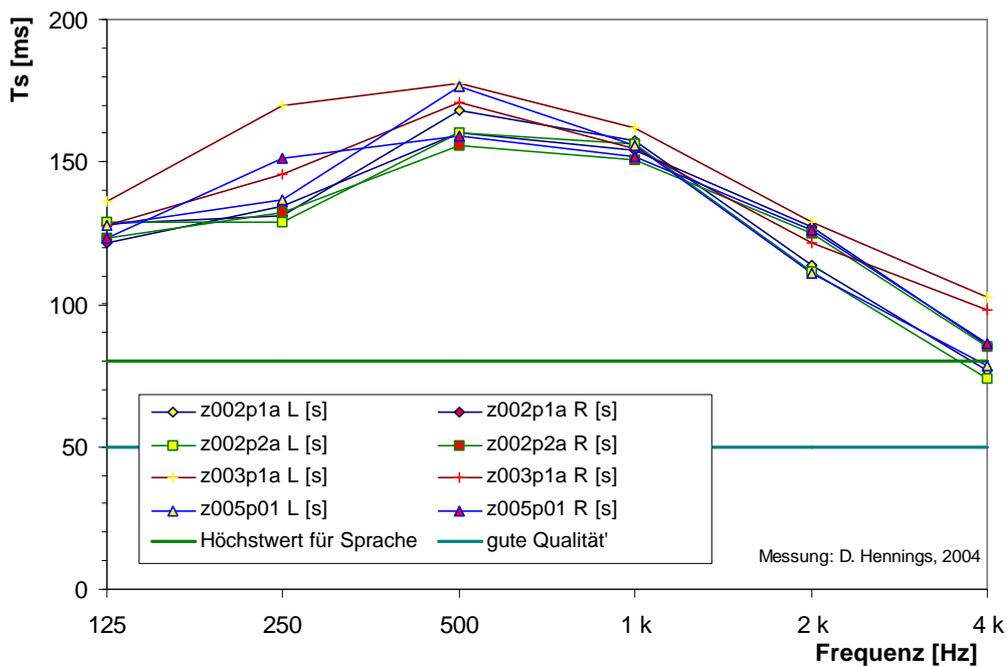
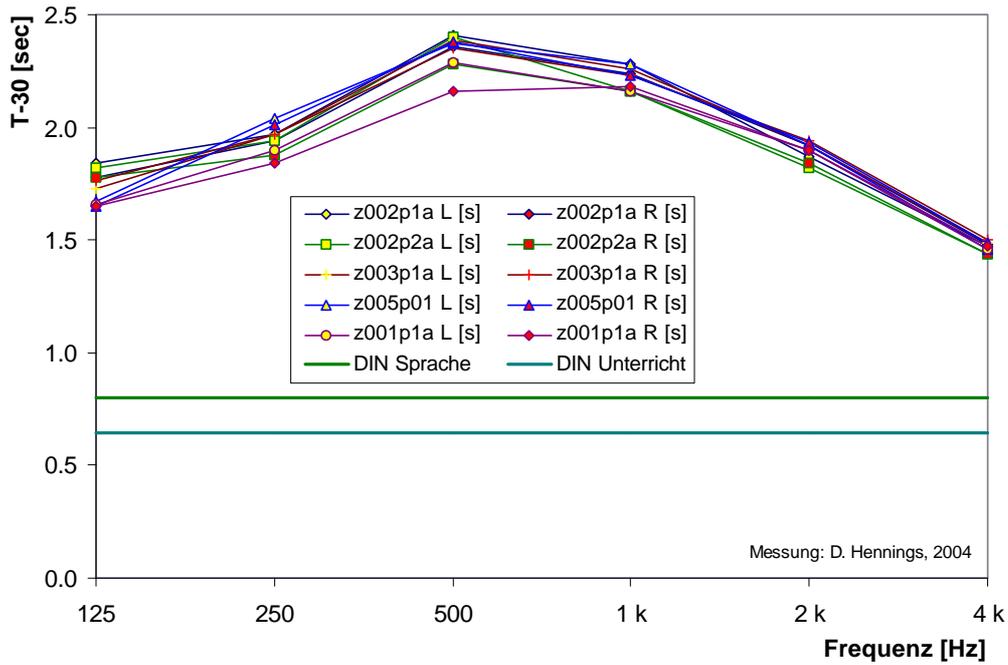
3.2.2. Messungen im ZUB-Hörsaal

In den Messungen im ZUB-Hörsaal wurde die überwiegende Nutzung des Raums als Vortragsraum nachgestellt. Mit verschiedenen Sprecher- und Hörer-Positionen wurden binaurale Raumimpulsantworten gemessen und daraus Qualitätsmaße abgeleitet. Die Vortragenden-Positionen waren am Rednerpult und seitlich neben der Projektionsfläche, die Hörer-Positionen verteilt im Publikums-Bereich, der aus drei Sitzreihen mit Tischen bestand. Diese Aufstellung entspricht einer kleinen Vorlesung oder einem Seminar. Mit Unterstützung der Mitarbeiter des Instituts konnte auch eine realitätsnah nachgestellte Vortrags-Situation mit 18 Personen, also alle drei Tischreihen im Raum voll besetzt, vermessen werden.

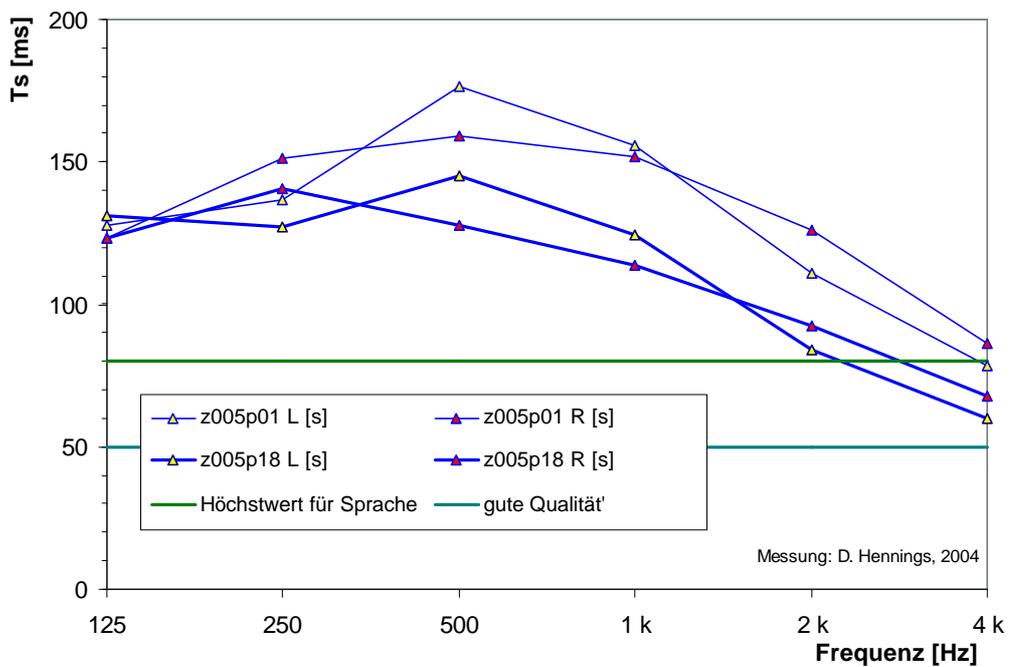
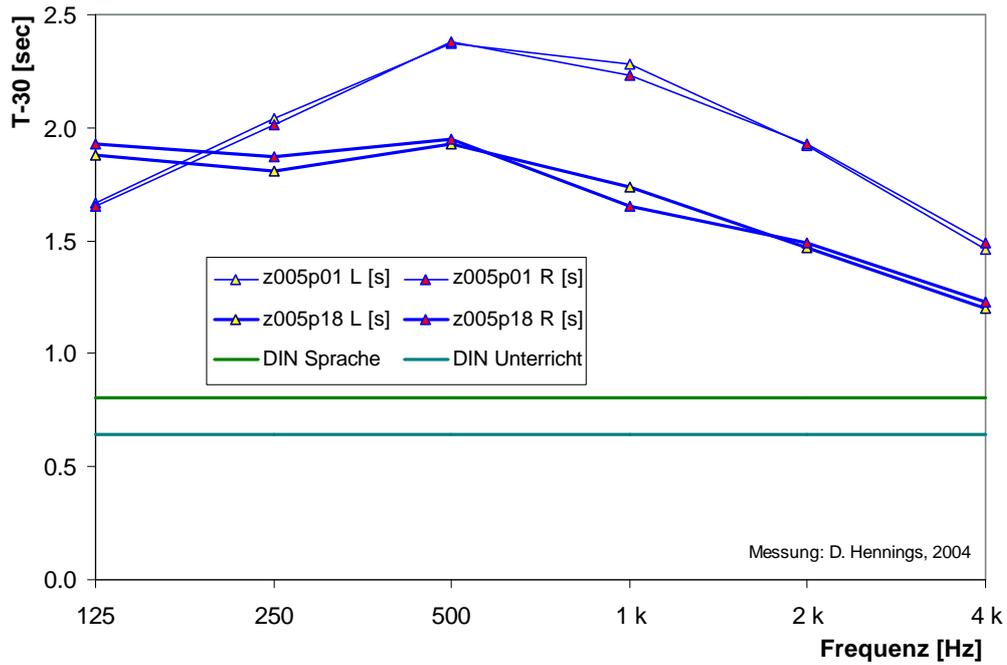


Grafik 3.2.4 Im Meßaufbau nachgestellte Vortrags-Situation mit 'Vortragendem' am Rednerpult und 'Hörer' in der ersten Reihe. Der Lautsprecher ist auf die Mitte der letzten Sitzreihe ausgerichtet. Die weiße Projektionswand rechts hinter dem 'Vortragendem' ist zugleich ein Plattenabsorber.

In Grafik 3.2.5 sind aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete T-30-Nachhallzeiten für verschiedene Sprecher- und Hörer-Positionen übereinander aufgetragen. Die gemessenen Nachhallzeiten sind nur wenig abhängig von den Positionen, liegen jedoch insgesamt wesentlich über den Empfehlungen der DIN 18041. Die unterhalb 500 Hz abnehmenden Nachhallzeiten zeigen die Wirkung der bei tiefen Frequenzen wirksamen Absorber. Die Schwerpunktzeiten zeigen ähnliche Effekte wie die Nachhallzeiten, mit etwas erhöhter Streuung bei tiefen Frequenzen.



Grafik 3.2.5 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete T-30-Nachhallzeiten (oben) und Schwerpunktzeiten (unten) im ZUB-Hörsall mit 1 und 2 Personen Besetzung, bei verschiedenen Positionen von Schallquelle und Schallempfänger, jeweils für den linken und rechten Kanal des Kunstkopf-Mikrofons. Zum Vergleich sind oben die Empfehlungen der DIN 18041 für die Nutzungsarten 'Sprache' und 'Unterricht' bei das Raumvolumen von ca. 350 m³ eingetragen.



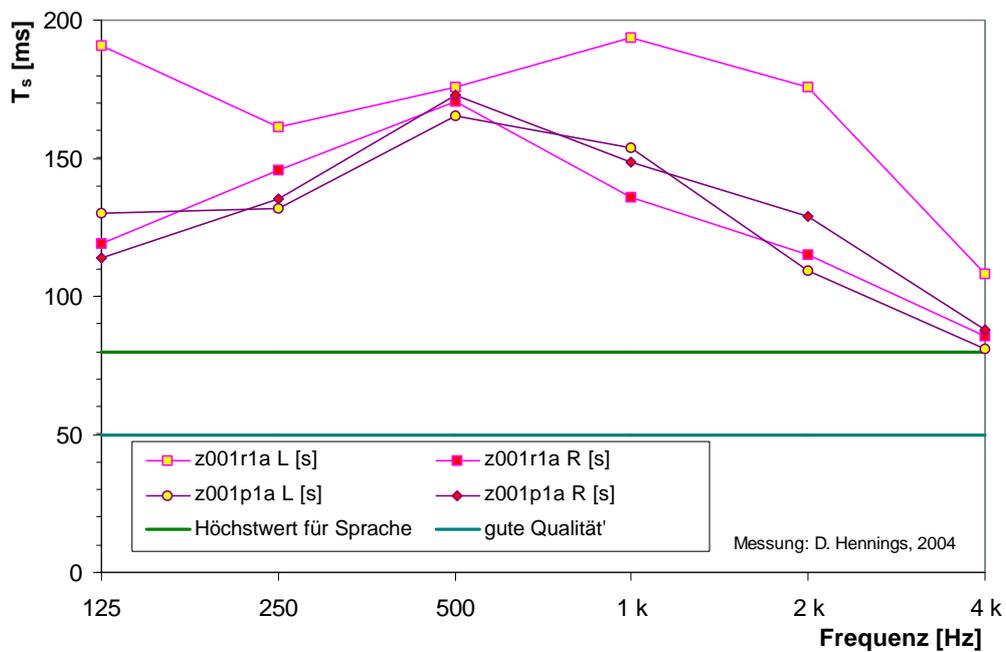
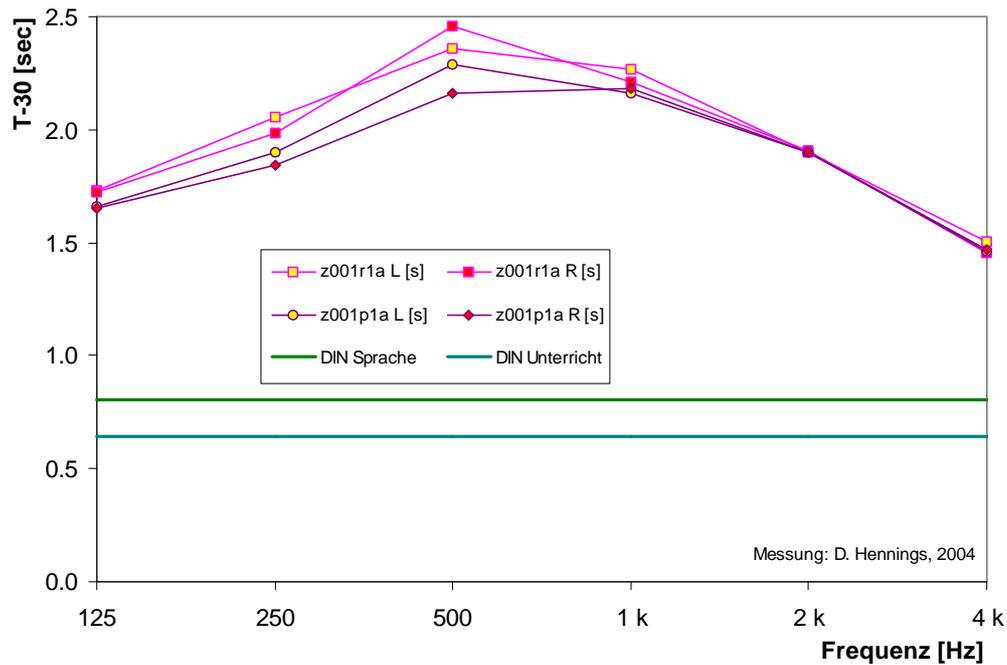
Grafik 3.2.6 T-30-Nachhallzeiten (oben) und Schwerpunktzeiten (unten) im ZUB-Hörsall bei 1 Person und bei 18 Personen Besetzung im Vergleich.

Grafik 3.2.6 zeigt im Vergleich die Ergebnisse für 1 Person und für 18 Personen Besetzung bei ansonsten gleicher Meßanordnung. Mit 18 Personen sind die Nachhallzeiten bei mittleren und hohen Frequenzen zwar deutlich reduziert, jedoch mit 1.5 bis 2.0 Sekunden im größten Teil des Frequenzbereichs immer noch zu hoch. Der gemessene Einfluß der Personen ist verträglich mit Angaben in DIN 18041, wenn man berücksichtigt, daß die sitzenden Personen die Sitzpolster akustisch 'deaktivieren'. Eine Ausnahme ist, daß bei 18 Personen Besetzung im 125 Hz-Oktavband die Nachhallzeiten gegenüber 1 Person etwas ansteigen. Dies läßt sich möglicherweise mit einer geänderten Anregung von Raummoden und damit einer veränderten Wirkung der Absorber im Raum erklären. Die Schwerpunktzeiten sind auch hier stark korreliert zu den Nachhallzeiten, bei größerer Streuung zwischen den Kanälen.

In Grafik 3.2.7 ist die Auswirkung gezeigt, wenn der Sprecher sich vom Publikum abwendet und den Kopf um 90° Richtung Projektionswand dreht. Dies ist ein Beispiel für Fälle, in denen die T-30-Nachhallzeit die Übertragungsqualität nur unzureichend beschreibt: die deutliche Verschlechterung im linken Ohr des Hörers ist zeigt sich in der Schwerpunktzeit, nicht aber in der Nachhallzeit.

Insgesamt decken sich die Meßergebnisse mit dem Eindruck verschiedener Nutzer, daß der Raum 'viel zu hallig' ist und einer raumakustischen Verbesserung bedarf.

Aus dem Vergleich der Meßergebnisse mit den Anforderungen der DIN 18041 zeigt sich, daß die Nachhallzeiten, je nach Frequenz und Besetzung, um einen Faktor zwei bis drei reduziert werden sollten. Das bedeutet, daß die äquivalenten Schallabsorberflächen verdoppelt bis verdreifacht werden müssen. Dies erscheint nicht ganz einfach, da die Oberflächen im Raum größtenteils nicht für Akustik-Maßnahmen zur Verfügung stehen oder bereits genutzt werden.



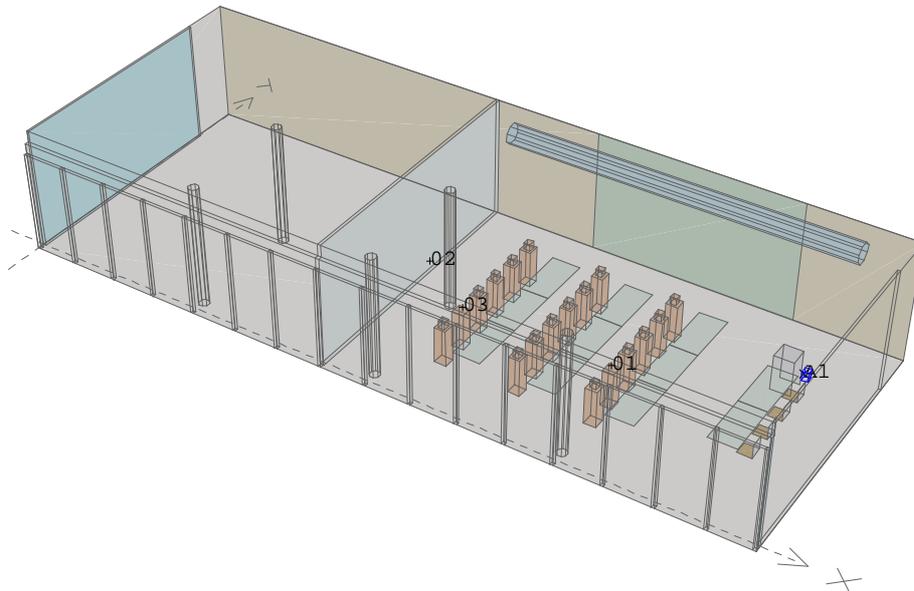
Grafik 3.2.7 Der Einfluß der Sprech-Richtung des Vortragenden auf die Übertragungs-Eigenschaften, oben in den T-30-Nachhallzeiten, unten in den Schwerpunktzeiten dargestellt. In 'z001p1a' ist der Sprecher auf das Publikum (Mitte der hintersten Reihe) ausgerichtet, in 'z001r1a' ist die 'Sprechrichtung' um 90° abgewendet Richtung Projektionsfläche, eine in Vorträgen häufig anzutreffende Situation. In den T-30-Nachhallzeiten bewirkt die abgewandte Sprechrichtung lediglich eine geringfügige Erhöhung unterhalb 1 kHz. In den Schwerpunktzeiten ist bei abgewandter Sprechrichtung ein großer Unterschied zwischen rechtem Ohr, das die dem Direktschall ähnliche Fenster-Reflexion des Sprechers empfängt und dem linken Ohr, das nur mehrfach-reflektierten und diffusen Schall empfängt.

3.2.3. Raumakustische Simulation des ZUB-Hörsaals

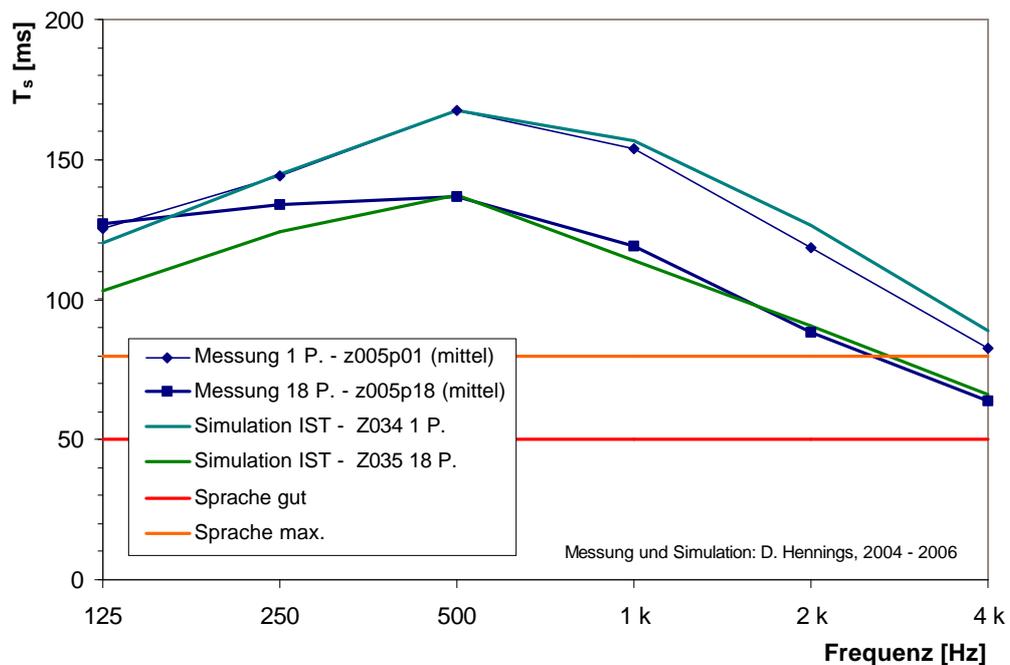
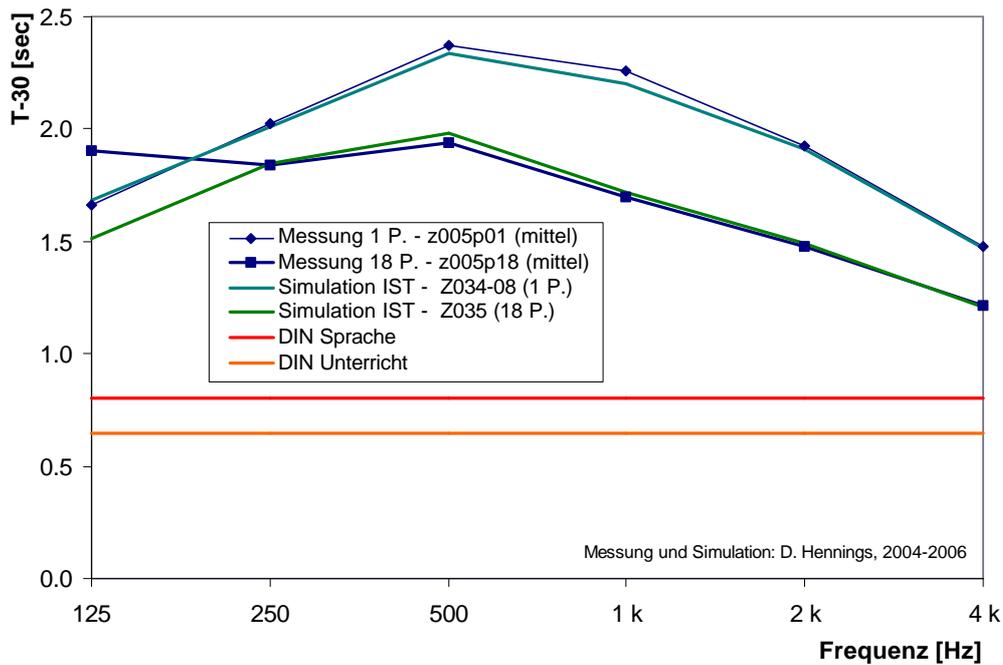
Anpassung des Simulationsmodells an die Meßergebnisse

Da zu den umschließenden Konstruktionen des Hörsaals keine Schallabsorptionsdaten vorlagen, wurde das primäre Simulations-Modell zur Nachbildung der Meßergebnisse zunächst mit angenäherten Daten aus der Literatur und der α -Datenbank der PTB aufgebaut. Anschließend wurden die Absorptionsdaten in physikalisch plausibler Weise so angepaßt, daß sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ergab. In Grafik 3.2.9 sind die Meß- und Simulations-Ergebnisse im Vergleich gezeigt.

Die Übereinstimmung Messung-Simulation ist nach der Anpassung gut, außer im 125 Hz-Oktavband, wo die Messung eine Erhöhung der Nachhallzeit bei 18 Personen gegenüber 1 Person zeigt. Dabei handelt es sich vermutlich um einen Effekt veränderter Eigenschwingungsmuster des Raums, der in der Simulations-Software nicht nachgebildet werden kann.



Grafik 3.2.8. Perspektivische Ansicht des Geometrie-Modells des ZUB-Hörsaals mit 18 Personen besetzt.

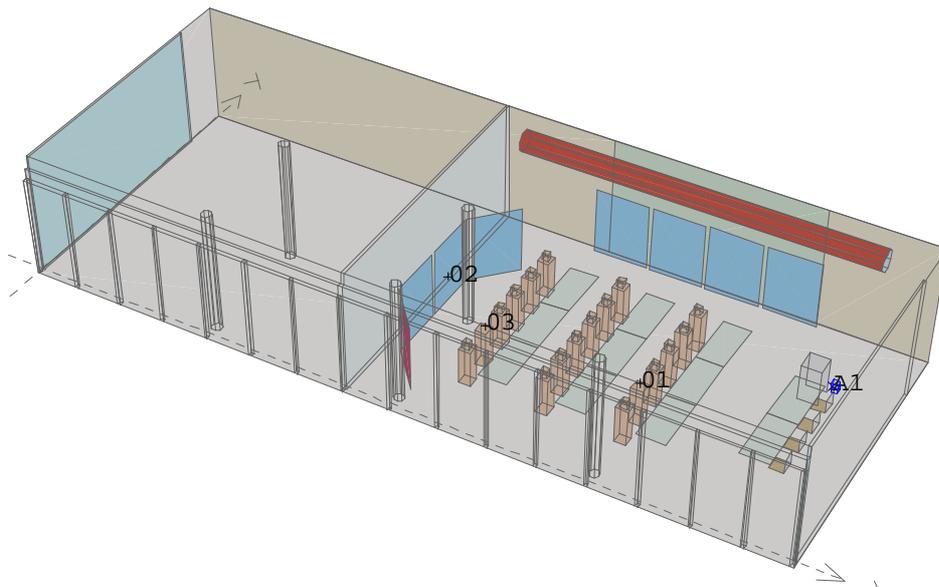


Grafik 3.2.9 Ergebnisse des angepassten Simulationsmodells im Vergleich zu Meßergebnissen. Die Grafik zeigt Meßergebnisse mit 1 und mit 18 Personen im Raum (z005p01 und z005p18), jeweils als Mittel des linken und rechten Meßkanals. Zudem sind die Ergebnisse der korrespondierenden simulierten Raumvarianten eingetragen.

Raumakustische Verbesserungen in der Simulation

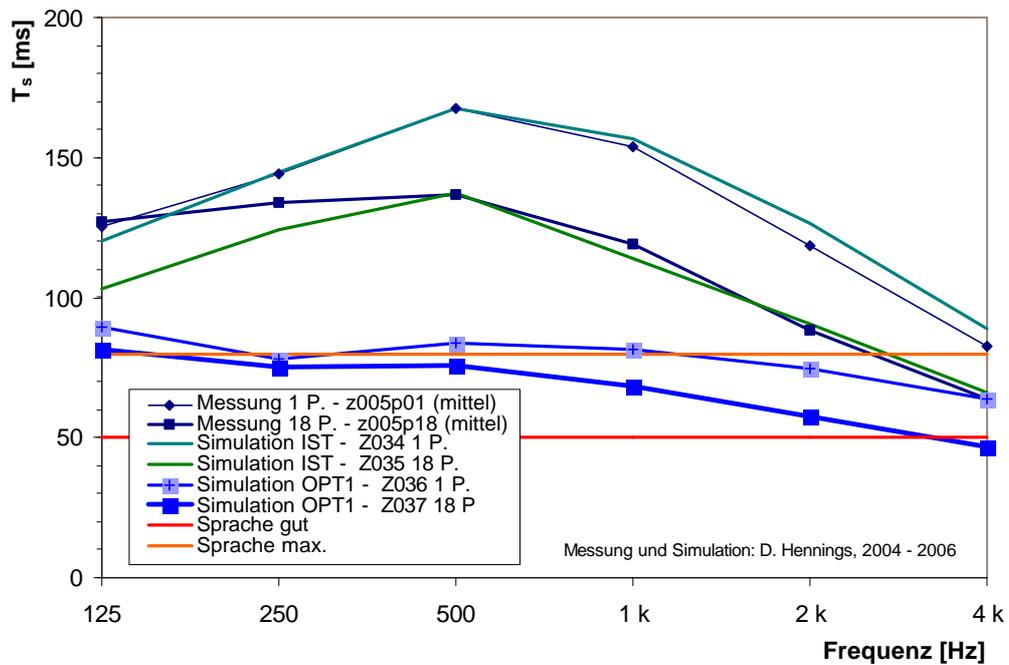
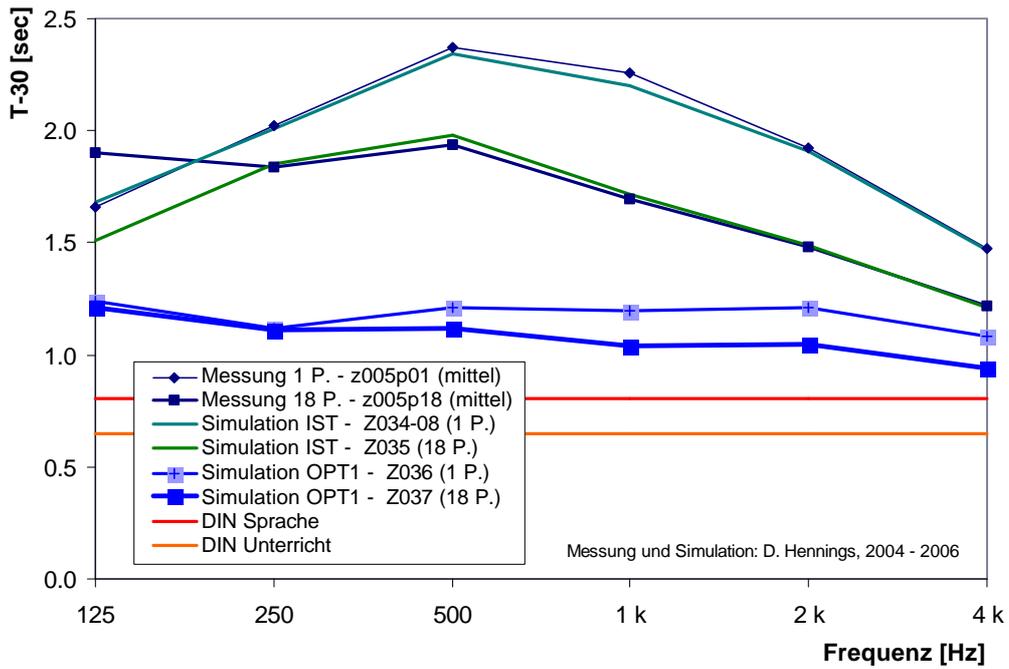
Für die raumakustische Verbesserungen wurde ein Ansatz gewählt, der die bereits beschriebenen Funktionen der Innen-Oberflächen des Raums nicht beeinträchtigt. Dazu wurde im Modell das längs den Raum durchlaufende Lüftungsrohr mit einem porösen Absorber belegt, der ab etwa 500 Hz breitbandig hohe Frequenzen absorbiert. Mangels genügend freier Oberflächen wurden zusätzlich Stellwände²⁶ im Raum installiert, deren Vorderseiten als Plattenabsorber mit Maximum um 500 Hz absorbieren und deren Rückseiten ebenfalls mit porösen Absorbern belegt sind. Grafik 3.2.10 zeigt das Simulationsmodell des verbesserten Raums. In Grafik 3.2.11 sind T-30-Nachhallzeiten und Schwerpunktzeiten aus den Simulations-Ergebnissen dargestellt.

Mit diesen Maßnahmen ergibt sich 'leer' (1 Person) breitbandig eine Nachhallzeit um 1.2 s, bei 18 Personen Besetzung ab 500 Hz um 1.0 .. 1.1 s. Dies liegt immer noch über der Empfehlung in DIN 18041 (2004), verbessert jedoch die Hörsamkeit deutlich gegenüber dem IST-Zustand, wie auch auralisierte Hörproben zeigen. Angesichts der knappen Flächen kann dies als akzeptabler Kompromiß für die Nutzung als Vorlesungs- und Seminar-Raum angesehen werden.



Grafik 3.2.10 Das Geometrie-Modell des Raums für die Simulation einer optimierten Version und mit 18 Personen besetzt. In dem Modell werden zwei zusätzliche Elemente zur akustischen Bedämpfung eingesetzt. Das Lüftungsrohr ist mit einem porösen Absorber verkleidet. Zusätzlich sind insgesamt acht Stellwände im Raum aufgestellt.

²⁶ Nach einer Anregung von F.Otto, ZUB.



Grafik 3.2.11 Mess- und Simulations-Ergebnisse wie in Grafik 3.2.9, jedoch mit zusätzlichen Simulations-Ergebnissen der in Grafik 3.2.10 dargestellten optimierten Variante mit 1 und mit 18 Personen.

²⁷ Dies ist die größte Oberfläche im Raum, die nicht bereits mit Funktionen belegt ist.

3.2.4. Auralisation des ZUB-Hörsaals

Mithilfe sowohl gemessener als auch simulierter Raum-Impulsantworten wurden Hörproben hergestellt. Die Hör-Vergleiche zwischen Meß- und Simulations-Hörproben zeigen bei verschiedenen Positionen und sowohl im leeren als auch im mit 18 Personen besetzten Raum recht gute Übereinstimmung. Es sind nur minimale Klangunterschiede und kleinere Räumlichkeits-Unterschiede zu hören. Das Ausklingen des Nachhalls ist in der Simulation etwas prägnanter als in der Messung.

Die ausgeprägte Hallcharakteristik des Raums mit Maximum bei 500 Hz ist gut wahrnehmbar, ebenso die Abnahme des Halls, wenn sich 18 Personen im Raum befinden. Gut erkennbar ist auch die mit vergrößelter Entfernung zu Sprecherposition verringerte Sprachverständlichkeit.

Die simulierten Varianten mit zusätzlichen Absorbern machen die erreichbaren Verbesserungen hörbar, lassen aber auch erkennen, daß eine optimale Bedämpfung des Raums mit der knappen äquivalenten Absorberfläche (mangels verfügbarer Oberflächen) noch nicht erreicht ist.

Tab. 3.2.1 Einige Hörproben zum ZUB-Hörsaal²⁸

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
33	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer 1	mess
34	ZUB-Hörsaal	18 P. Vortrag, Hörer 1	mess
36	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer 1	sim
39	ZUB-Hörsaal	18 P. Vortrag, Hörer 1	sim
41	ZUB-Hörsaal	Abs. auf Lüftungsrohr 1 P. Vortrag, H.1	sim
43	ZUB-Hörsaal	Abs. auf Lüftungsrohr 18 P. Vortrag, H.1	sim
45	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 1 P. Vortrag, H.1	sim
47	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 18 P. Vortrag, H.1	sim

²⁸ Weitere Hörproben sind in der Übersicht in Anhang 2 aufgeführt. Die Nummern der Hörproben beziehen sich auf diese Übersicht.

3.3 Unterrichtsraum im Neubau der Gebhard-Müller-Schule in Biberach

3.3.1 Beschreibung des Meßobjekts

Die 2004 fertiggestellte Gebhard-Müller-Schule des Kreisberufsschulzentrums Biberach dient der Berufsausbildung in kaufmännischen Berufen. Das Gebäude mit ca. 5500 m² Hauptnutzfläche auf drei Etagen ist für etwa 1500 Schüler ausgelegt. Das Gebäude ist als Stahlbeton-Skelett gebaut und mit mittlerem U-Wert von 0.43 W/m²K und $A/V = 0.31 \text{ m}^{-1}$ sehr gut wärmegeklämt. Das Gebäude wird über eine Betonkerntemperierung beheizt und gekühlt, wobei das Grundwasser als Wärme-Quelle und -Senke dient. Zusätzlich wird die Zuluft der Lüftungsanlage bei Bedarf vortemperiert. Spitzenheizlasten werden von einem Holzpelletkessel gedeckt.²⁹

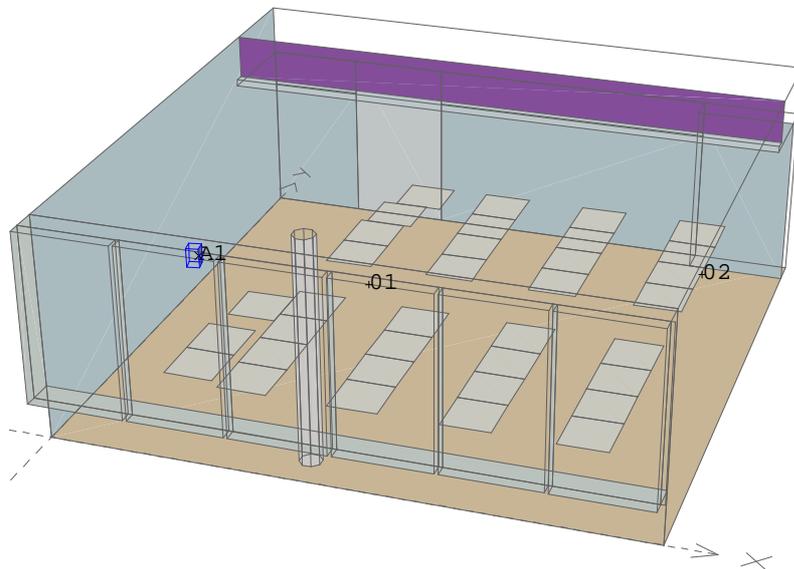


Grafik 3.3.1. Fassaden-Ansicht der Gebhard-Müller-Schule in Biberach (Quelle: GMS)

Als Meßobjekt wurde ein Unterrichtsraum mit 32 Schülerplätzen, 60 m² Grundfläche und etwa 180 m³ Nettovolumen ausgewählt. Dieser Raum ist repräsentativ für den größten Teil der Unterrichtsräume der Gebhard-Müller-Schule.

²⁹ Eine detaillierte Beschreibung des Gebäudes befindet sich in der Solarbau-Dokumentation [GMS, 2004]

Die Unterrichtsräume sind mit Leichtbauwänden untereinander und von den Fluren getrennt. Die Decken teilen sich in etwa 80% Betonfläche und 20% abgehängten Deckenkoffer für Lüftung und andere Installationen auf. Der Boden ist mit Nadelfilz belegt. Die akustische Bedämpfung erfolgt durch Lochplatten-Absorber in der Fensterbrüstung und am Deckenkoffer sowie den Nadelfilzboden und die als Plattenabsorber wirkenden Leichtbauwände.



Grafik 3.3.2 Das Geometrie-Modell des vermessenen Unterrichtsraums



Grafik 3.3.3 Die Meßanordnung mit 'stehendem Sprecher' und 'sitzendem Hörer'

3.3.2. Messungen in einem repräsentativen Unterrichtsraum

Im ausgewählten Raum wurden typische Unterrichts-Situationen als Meßaufbau nachgestellt: Stehender Sprecher an der Tafel und am Tisch sitzender Sprecher, jeweils mit verschiedenen Hörer-Positionen³⁰. Messungen erfolgten sowohl mit 1 Person (dem Experimentator) im Raum, als auch mit insgesamt 17 Personen im Raum, was der Hälfte der maximalen Besetzung entspricht. Grafik 3.3.5 zeigt aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete T-30-Nachhallzeiten mehrerer Messungen übereinander gezeichnet.

Die Ergebnisse zeigen einen sehr gleichmäßigen spektralen Verlauf der Nachhallzeiten sowohl im fast leeren als auch im teilbesetzten Zustand. Die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Ort ist gering. Lediglich bei tiefen Frequenzen, wo Raummoden einen erheblichen Einfluß haben können, steigt die Streuung der Werte. Der Einfluß der Personen auf die Meßergebnisse entspricht ab 500 Hz ungefähr den Angaben in DIN 18041 für 'Schüler an Holztischen'. Unterhalb 500 Hz sind die Schwankungen der Meßwerte zu groß für sinnvolle Aussagen über den Einfluß der Besetzung.

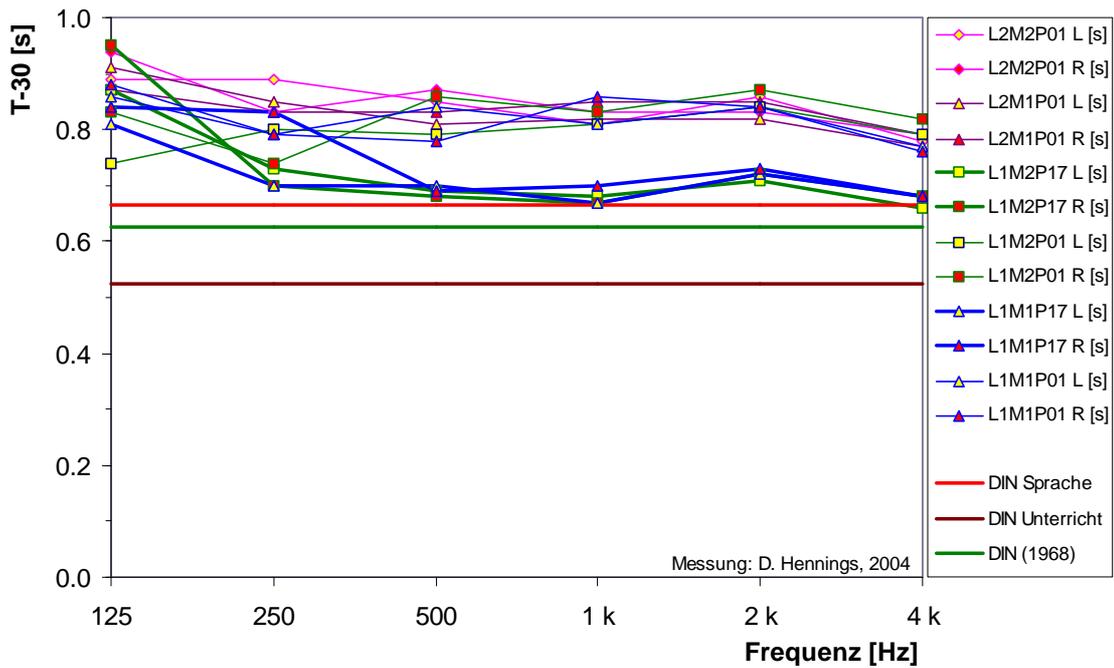


Grafik 3.3.4 Messung im besetzten Raum - im Hintergrund das Kunstkopf-Mikrofon.

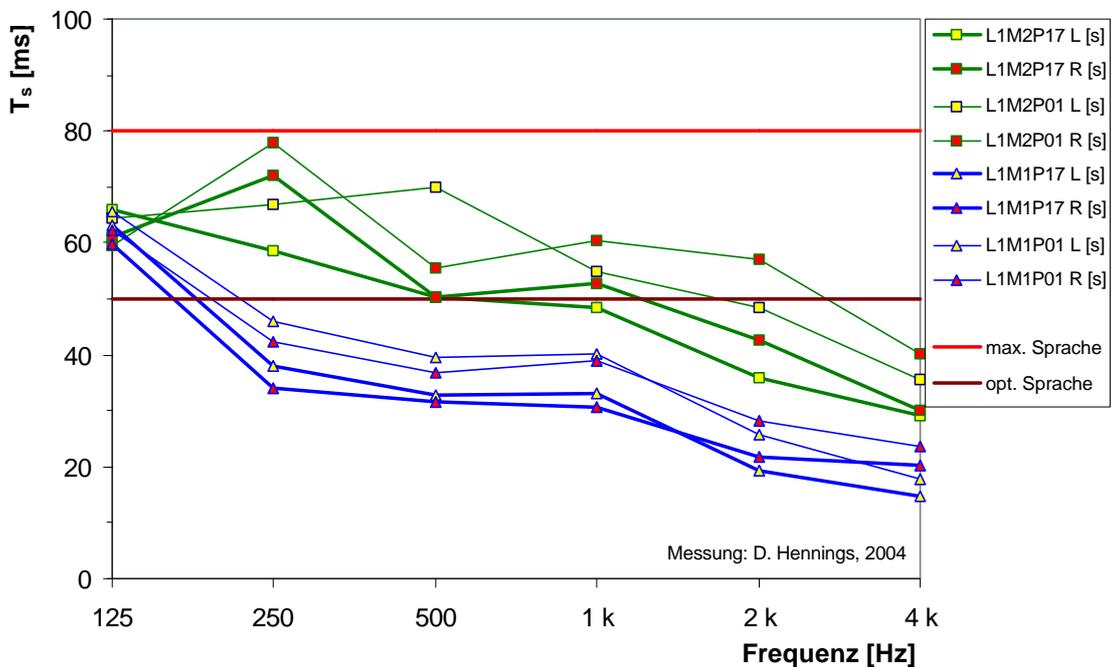
Die Schwerpunktzeiten (Grafik 3.3.6) zeigen ebenfalls durchweg gute bis sehr gute Werte. Anders als bei den Nachhallzeiten zeigt sich hier eine deutliche Abhängigkeit der Entfernung zwischen Sprecher und Hörer. Bei geringer Entfernung (L1M1) zeigen sich merklich bessere Werte als bei größerer Entfernung (L1M2). Andererseits zeigen die Schwerpunktzeiten weniger Abhängigkeiten von der Besetzung des Raums.

Die Meßergebnisse entsprechen insgesamt Berichten von Nutzern, daß die Unterrichts-räume der Schule akustisch angenehm sind und daß Sprache sehr gut zu verstehen ist.

³⁰ Die Anordnung der Tische im Raum läßt auf überwiegenden Frontalunterricht schließen.



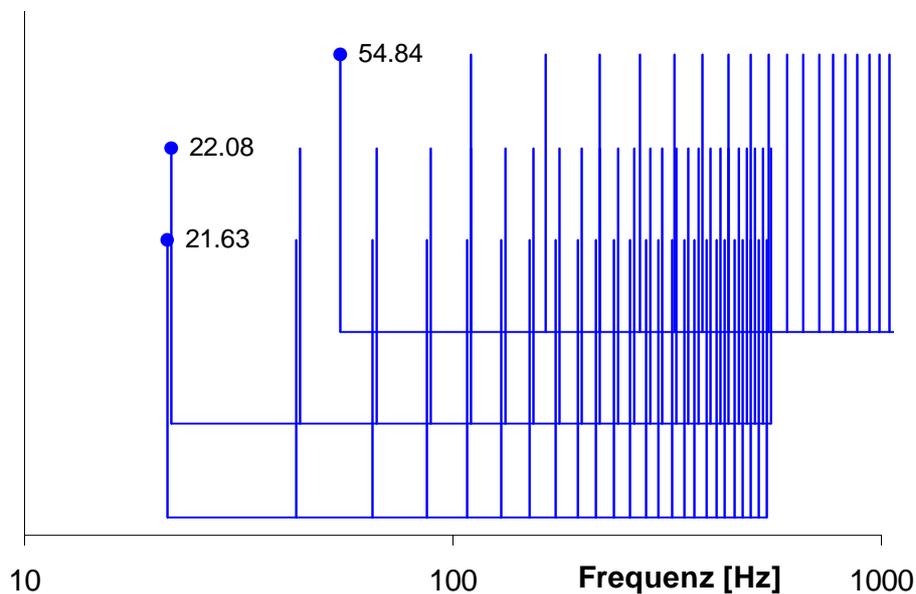
Grafik 3.3.5 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Nachhallzeiten des vermessenen Unterrichtsraums im Sprache-relevanten Spektralbereich. Sprecher stehend (L1) und sitzend (L2), Hörer an zwei Positionen sitzend (M1 und M2). Mehrere Messungen mit 1 (P01) und 17 (P17) Personen im Raum. Jede Messung für den linken (L) und rechten (R) Kanal des Kunstkopf-Mikrofons. Zum Vergleich sind die Empfehlungen der neuen DIN 18041 (2004-05) für die Nutzungarten 'Sprache' und 'Unterricht', sowie der während der Planung noch gültigen DIN 18041 (1968) eingezeichnet.



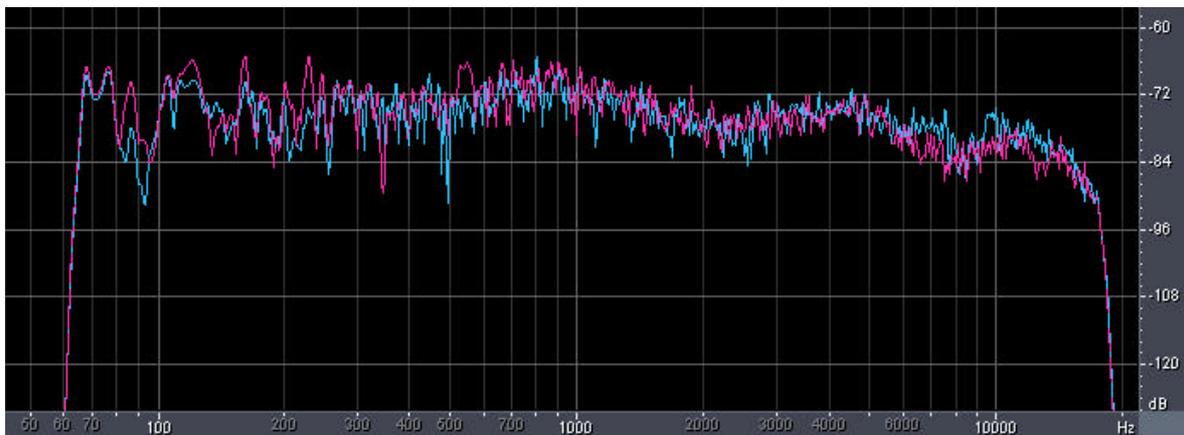
Grafik 3.3.6 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Schwerpunktzeiten, bei etwa 2.2 m (blaue Kurven) und bei 6.6 m (grüne Kurven) Entfernung zwischen Schallquelle und Mikrofon jeweils bei mit 1 Person (dünne Kurven) und mit 17 Personen (fette Kurven) im Raum. Auf die Schwerpunktzeiten hat die Entfernung einen etwas größeren Einfluß als die Besetzung des Raums.

Eigenfrequenzen des Raums

Beide horizontale Abmessungen des Raums liegen im Bereich 7.85 m \pm 0.2 m und damit nahe beieinander, so daß die zu diesen Raumrichtungen gehörigen longitudinalen Eigenfrequenzen nahezu zusammenfallen. Es besteht also ein Risiko ausgeprägter Raumresonanzen, zumal bei etwas über 100 Hz die Eigenfrequenzen 5. Ordnung der beiden horizontalen Achsen mit der 2. Ordnung der vertikalen Achse zusammenfallen; und entsprechend bei Vielfachen dieser Frequenzen. Eine ausgeprägte Resonanz bei 100 Hz wäre kritisch, da sie in den Grundtonbereich von Männerstimmen fällt. Wie das in Grafik 3.3.8 gezeigten Beispiel für ein Übertragungs-Spektrum zeigt, sind die Resonanzen nur schwach ausgeprägt. Die Bedämpfung des Raums bei tiefen Frequenzen reicht also offenbar aus um störende Raumresonanzen zu verhindern. Das entspricht auch dem Hör-eindruck, daß der Raum nicht zum 'Dröhnen' neigt.



Grafik 3.3.7 Berechnetes Spektrum der longitudinalen Raum-Eigenfrequenzen bis zur 25. Ordnung in den drei Hauptachsen-Richtungen des Raums.

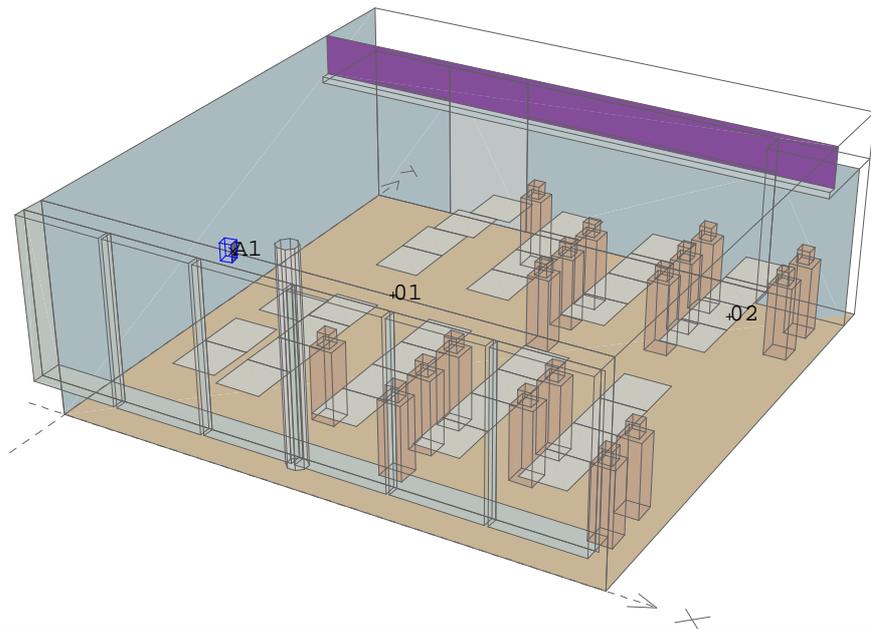


Grafik 3.3.8 Beispiel für das Übertragungs-Spektrum einer Messung. Wegen der unteren Grenzfrequenz des Lautsprechers von 58 Hz wurde nur oberhalb 60 Hz gemessen.

3.3.3. Simulationen zum vermessenen Unterrichtsraum

Simulationsmodell zur Meßanordnung

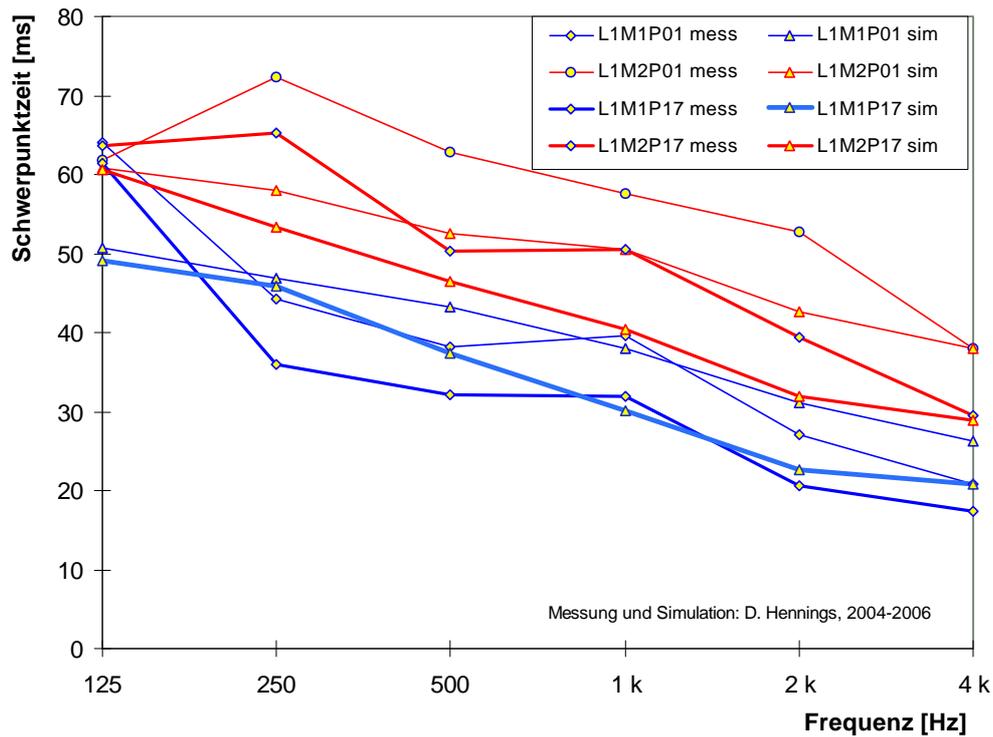
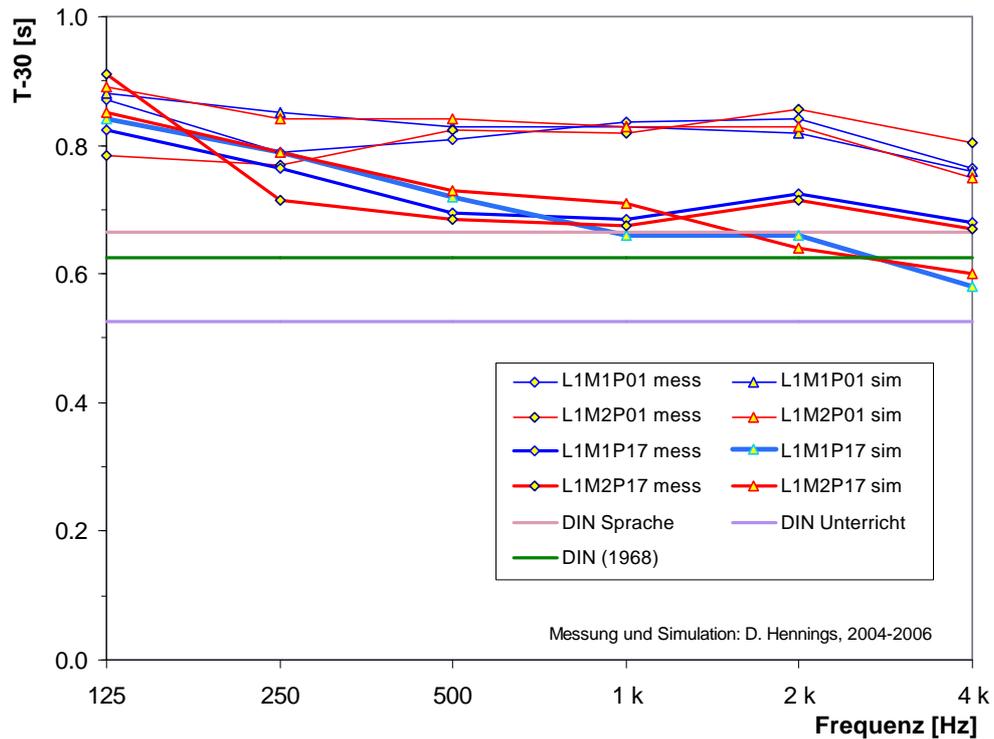
Für den vermessenen Unterrichtsraum wurde ein angepasstes Simulationsmodell entwickelt, daß die gemessenen Raumeigenschaften näherungsweise wiedergibt. Hierfür war auch bei diesem Meßobjekten eine physikalisch plausible Modifikation der Schallabsorptionsgrade gegenüber Planungs- und Literatur-Werten notwendig. Das Geometriemodell ist in Grafik 3.3.9 wiedergegeben. Grafik 3.3.10 zeigt Nachhallzeiten und Schwerpunktzeiten aus den Simulationen im Vergleich zu den Meßwerten.



Grafik 3.3.9 Das Geometrie-Modell des Unterrichtsraums mit 17 Personen besetzt, Sitzanordnung für Frontalunterricht (wie bei der Messung).

In den Nachhallzeiten stimmen Meß- und Simulationsergebnisse gut überein, wobei in der Simulation die Personen bei hohen Frequenzen etwas mehr bedämpfen, als in der Messung. In den Schwerpunktzeiten sind die Unterschiede zwischen Messung und Simulation etwas größer³¹. Dennoch zeigen sich in den simulierten Schwerpunktzeiten die gleichen Effekte wie in der Messung.

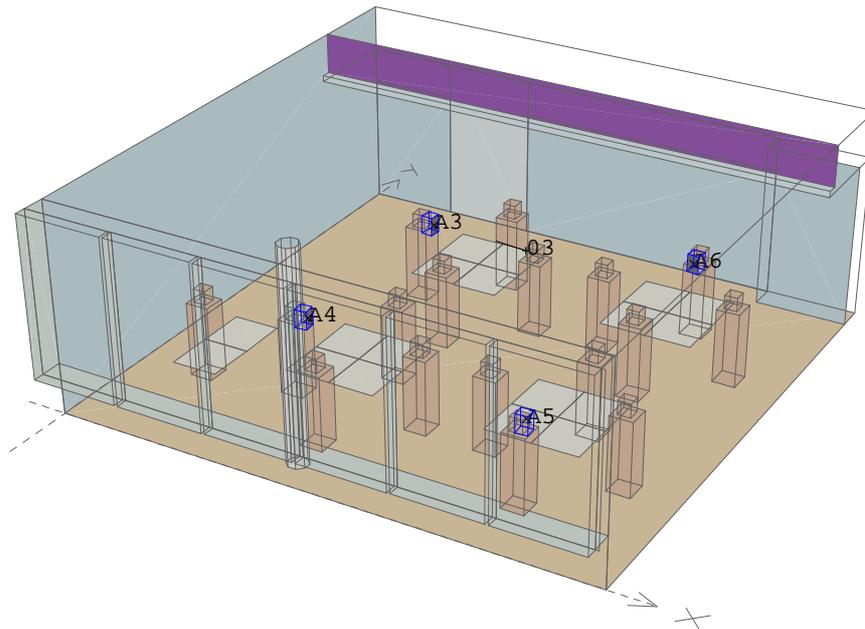
³¹ Dies ist nicht verwunderlich, da die T-30-Nachhallzeiten und nicht die Schwerpunktzeiten als Optimierungs-Kriterien beim Anpassen des Simulationsmodells genutzt wurden.



Grafik 3.3.10 Ergebnisse des angepassten Simulations-Modells leer und mit 17 Personen besetzt (Anordnung für Frontalunterricht), sowie die jeweils entsprechenden Meßwerte, oben die T-30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten. .

Simulationsmodell zur Gruppenarbeit

Da Unterrichtsräume nicht nur zum Frontalunterricht, sondern auch zur Gruppenarbeit genutzt werden können, wurde in der Simulation eine solche Situation nachgestellt (vgl. Grafik 3.3.11). Dabei ist angenommen, daß vier Gruppen à vier Personen parallel im Raum arbeiten. Wenn pro Gruppe eine Person redet, sind das bis zu vier Personen gleichzeitig im Raum. Um die Auswirkungen dieser Konstellation zu untersuchen, wurde das Modell mit einem 'Hörer' (O3 in Grafik 3.3.11) und vier 'Sprechern' versehen. Ein 'Sprecher' (A3) sitzt dem 'Hörer' am Tisch gegenüber, die übrigen 'Sprecher' (A4 bis A6) sind an den anderen Tischen verteilt.



Grafik 3.3.11 Das Geometrie-Modell des Unterrichtsraums mit 17 Personen besetzt, Sitzanordnung für Gruppenarbeit. .

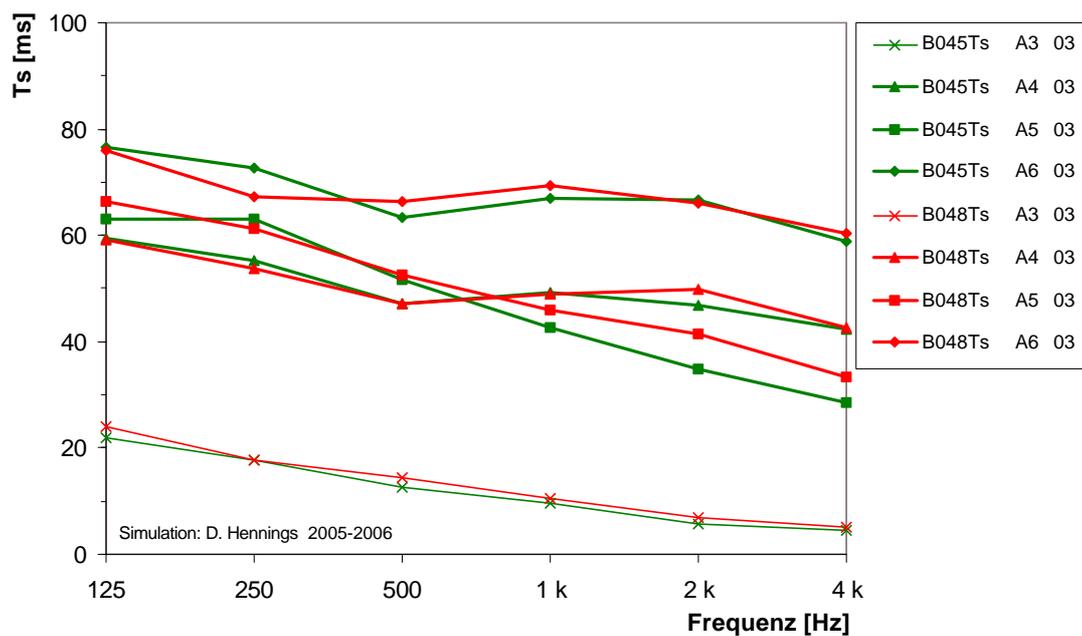
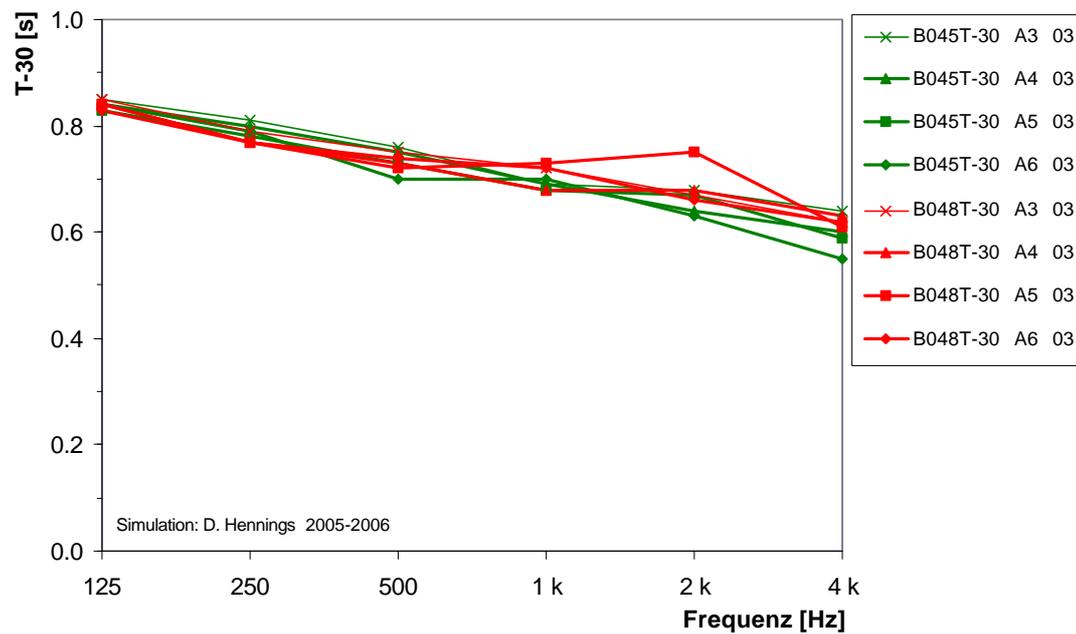
Bei Gruppenarbeit erfolgt die Kommunikation an den einzelnen Tischen. Die im Frontalunterricht erwünschte gute raumweite Schallübertragung ist bei Gruppenarbeit unerwünscht, da sie zu gegenseitiger Störung der Gruppen führt.

Mit dem Simulationsmodell wurde die Gruppenarbeits-Situation sowohl im Raum mit der realisierten akustischen Ausstattung als auch in einer modifizierten Variante, in der die Absorber-Wirkung der Brüstung und des Deckenkoffers bei gleichbleibender äquivalenter Absorberfläche an die Decke verlagert waren.

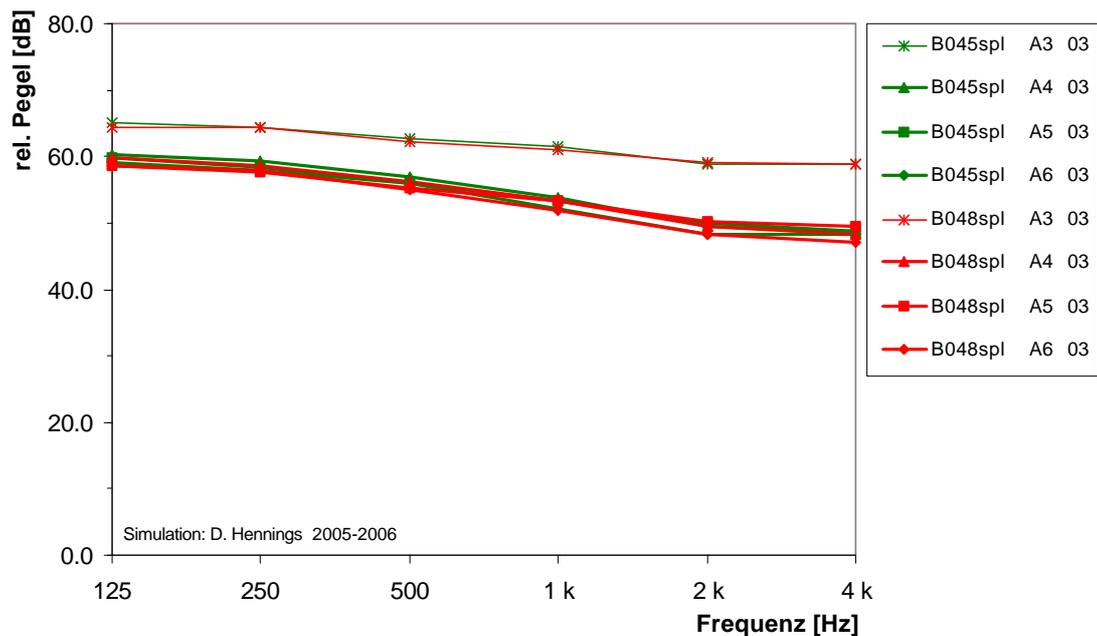
Die Simulations-Ergebnisse zeigen in den T-30-Nachhallzeiten und den Schwerpunktzeiten nur geringe Unterschiede, in den Schallpegeln nahezu keine zwischen den beiden Raum-Varianten. Die Schwerpunktzeiten zeigen eine sehr gute Übertragungsqualität zum Hörer am gleichen Tisch, aber auch eine akzeptable bis gute Übertragung zu den Nachbartischen. Die Pegel sind bei beiden Raumvarianten an den Nachbartischen bei

³² Nach den Kriterien der DIN 18041 wandelt sich der Raum damit von der Gruppe A zu Gruppe B

tiefen Frequenzen etwa 3 dB, bei hohen Frequenzen etwa 5 dB leiser als am Tisch des Sprechers.



Grafik 3.3.12 Ergebnisse des Simulations-Modells zur Gruppenarbeit im Unterrichtsraums mit 17 Personen, oben die T-30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten. Die grünen Kurven beziehen sich auf den Raum mit schallharter Decke, die roten Kurven auf die teilabsorbierende Decke. Dünne Kurven betreffen Sprecher und Hörer am selben Tisch, fette Kurven Sprecher an anderen Tischen.

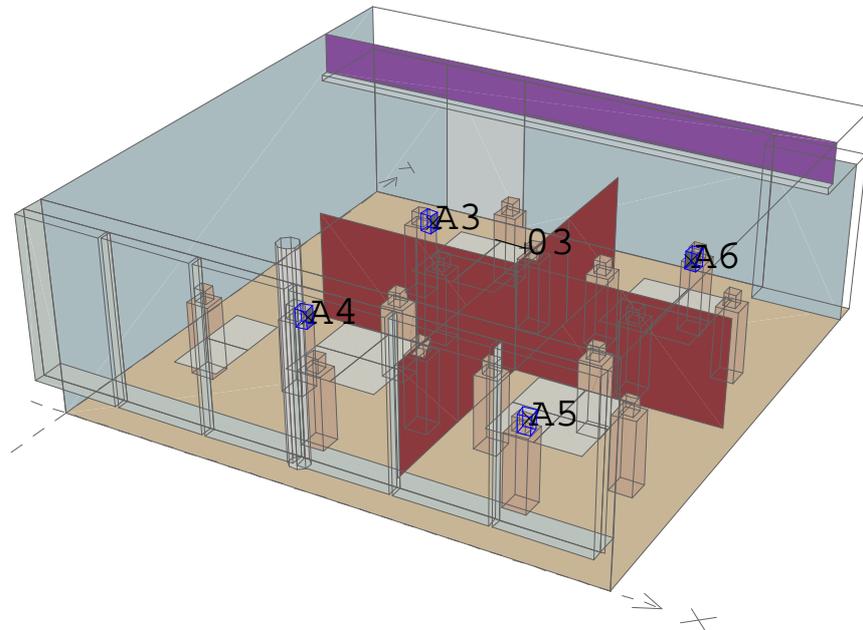


Grafik 3.3.13 Ergebnisse des Simulations-Modells zur Gruppenarbeit im Unterrichtsraums mit 17 Personent, hier die relativen Pegel am Hörerort. Die Schallquelle ist willkürlich kalibriert, so daß nur die Pegel-Differenzen, nicht aber die absoluten Pegel aussagekräftig sind. Die Kurven-Zuordnung entspricht Grafik 3.3.12. Die grünen Kurven werden wegen der hohen Übereinstimmung weitgehend von den roten Kurven verdeckt.

Aus diesen Ergebnissen läßt sich schließen, daß der für Frontalunterricht sehr geeignete Unterrichtsraum in beiden Varianten für die simultane Arbeit mehrerer Gruppen im Raum nicht so gut geeignet ist³³, da gegenseitige Störungen der Gruppen möglich sind. Die akustische Gestaltung der Decke hat in diesem Raum nur geringen Einfluß auf diese Bewertung.

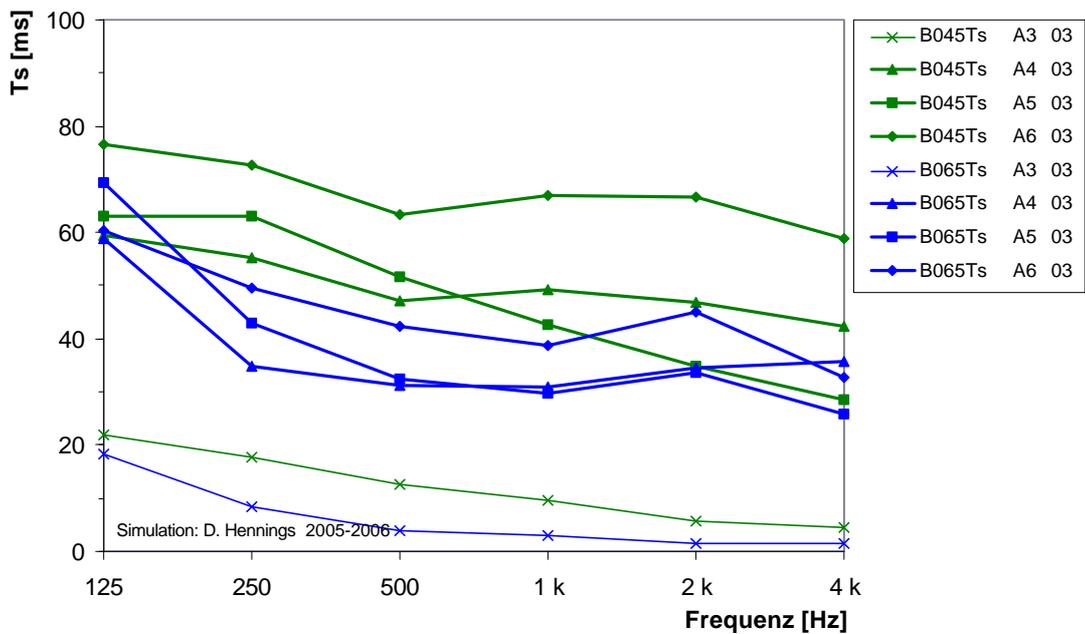
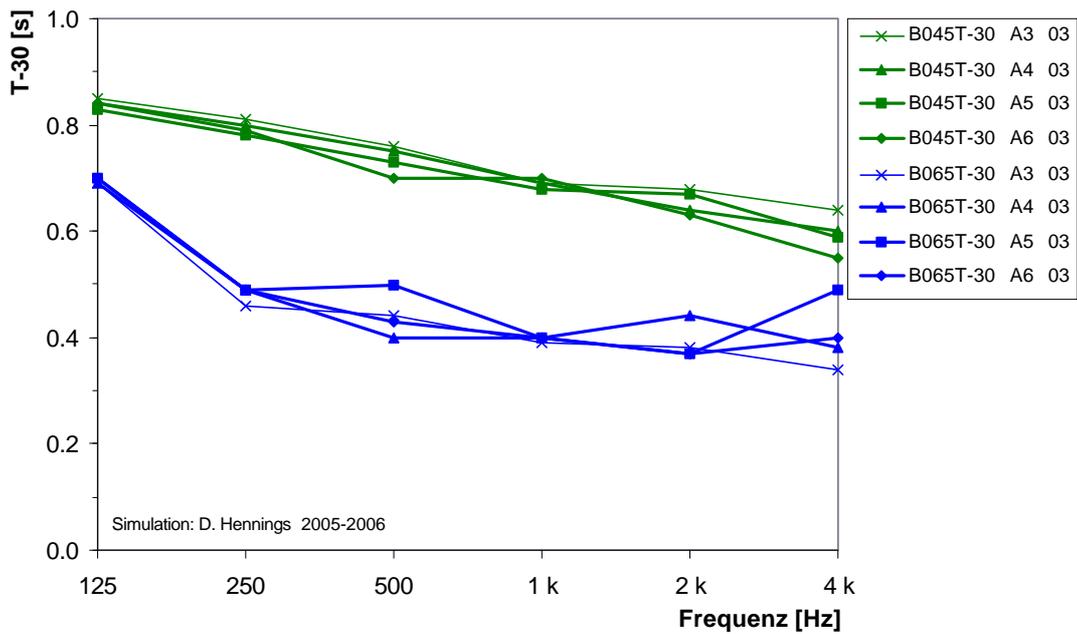
³³ Das ist aber nicht Folge eine ungeeigneten Akustischen Planung, sondern Ausdruck der Tatsache, daß ein Raum nicht zugleich für raumweite Kommunikation geeignet sein kann und für mehrere Gruppen akustisch 'parzelliert' sein kann.

In einer weiteren Variante wurde untersucht, welche Auswirkungen im Raum aufgestellte absorbierende Stellwände auf die Eignung für Gruppenarbeit haben. Mit einer kreuzförmigen Anordnung der Stellwände werden alle direkten Schallwege zwischen den Arbeitsgruppen unterbrochen. Die Stellwände sind im Modell ab etwa 250 Hz bei mittleren und hohen Frequenzen breitbandig absorbierend ausgeführt. Grafik 3.3.14 zeigt die Geometrie des Modells.

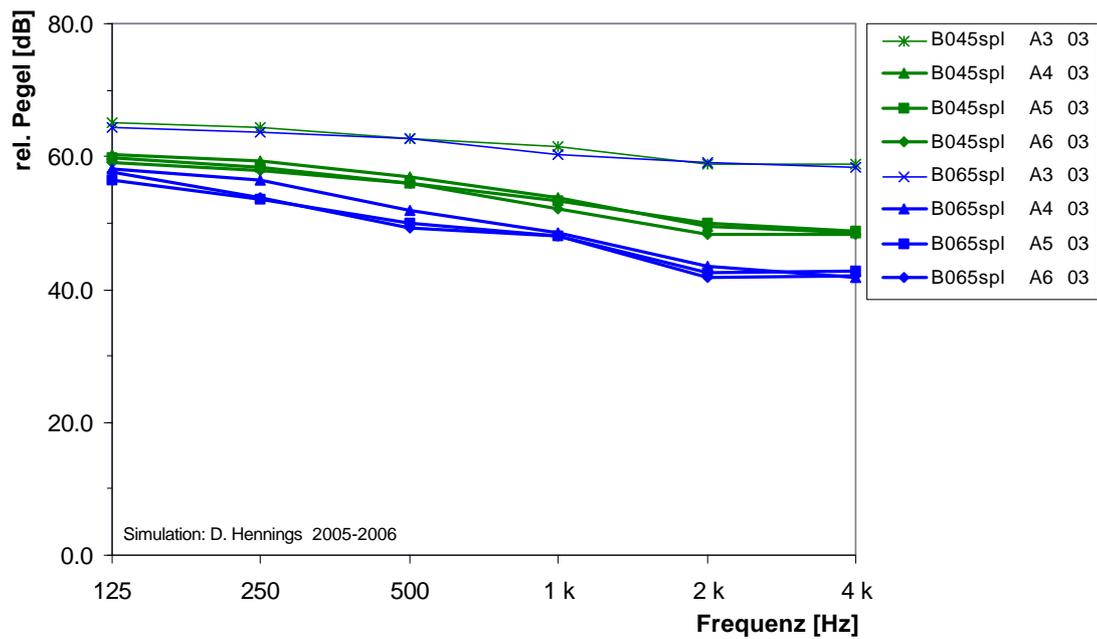


Grafik 3.3.14 Das Geometrie-Modell des Unterrichtsraums mit nachgestellter Gruppenarbeits-Situation und zusätzlichen Stellwänden zwischen den Gruppen. .

Die Ergebnisse des Modells (Grafik 3.3.15) zeigen zunächst eine deutliche Senkung der Nachhallzeiten, die durch die zusätzlichen Absorberflächen bedingt sind. Die Schwerpunktszeiten werden innerhalb einer Gruppe mit Werten größtenteils unter 10 ms sehr gering, aber auch zwischen den Gruppen liegen die Werte oberhalb 125 Hz bei niedrigen 30 ms bis 40 ms. Die relativen Schallpegel (Grafik 3.3.16) zwischen den Gruppen werden von den Stellwänden um etwa 5 dB abgeschwächt, zu hohen Frequenzen hin leicht zunehmend. Innerhalb der Gruppe bleiben die Schallpegel unverändert. Zusammenfassend lässt sich sagen, daß die Stellwände die Trennung der Gruppen voneinander merklich verbessern.



Grafik 3.3.15 Ergebnisse des Simulations-Modells zur Gruppenarbeit im Unterrichtsraums mit 17 Personen und zusätzlichen Stellwänden, oben die T-30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten. Die grünen Kurven beziehen sich auf den Raum ohne Stellwände, die blauen Kurven auf den Raum mit Stellwänden. Dünne Kurven betreffen Sprecher und Hörer am selben Tisch, fette Kurven Sprecher an anderen Tischen.



Grafik 3.3.16 Ergebnisse des Simulations-Modells zur Gruppenarbeit im Unterrichtsraums mit 17 Personen und zusätzlichen Stellwänden, hier die relativen Pegel am Hörerort. Die Schallquelle ist willkürlich kalibriert, so daß nur die Pegel-Differenzen, nicht aber die absoluten Pegel aussagekräftig sind. Die grünen Kurven beziehen sich auf den Raum ohne Stellwände, die blauen Kurven auf den Raum mit Stellwänden. Dünne Kurven betreffen Sprecher und Hörer am selben Tisch, fette Kurven Sprecher an anderen Tischen.

3.3.4. Auralisation des Unterrichtsraums

Sowohl mit den gemessenen als auch mit den simulierten Raumimpulsantworten wurden Hörproben zum gemessenen Raum hergestellt.

Vergleich Messung - Simulation

Der Vergleich der 'gemessenen' mit den jeweils zugehörigen 'simulierten' Hörproben zeigt eine gute Übereinstimmung des Halligkeit des Raums, der Sprachübertragungs-Qualität und des Klangs der Stimmen. Bei direktem Wechsel zwischen 'gemessener' und 'simulierter' Hörprobe ist aber auch ein Unterschied in der Räumlichkeit und in der wahrgenommenen Sprecher-Position hörbar. Die Ähnlichkeit ist insgesamt so groß, daß die simulierten Hörproben ohne weiteres als Hilfsmittel für Planungs-Entscheidungen dienen können.

Tab. 3.3.1 Einige Hörproben zum GMS-Unterrichtsraum³⁴

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
49	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 1	mess
50	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 2	mess
51	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1	mess
52	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2	mess
53	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 1	sim
54	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 2	sim
55	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1	sim
56	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2	sim
57	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1, ein Ohr -40 dB	sim
58	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2, ein Ohr -40 dB	sim
59	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, gegenüber	sim
60	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, Nachbartisch 1	sim
63	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, gegenüber	sim
64	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, Nachbartisch 1	sim

³⁴ Weitere Hörproben sind in der Übersicht in Anhang 2 aufgeführt.
Die Nummern der Hörproben beziehen sich auf diese Übersicht.

Auralisation der Wirkung eines Hörfehlers

In der neuen Fassung der DIN 18041 werden für die Nutzungsart 'Unterricht' gegenüber der alten Fassung deutlich verringerte Nachhallzeiten empfohlen, dies insbesondere mit Rücksicht auf Personen mit eingeschränktem Hörvermögen. Um für 'Normalhörige' einen groben Eindruck von der Auswirkung eines Hörfehlers in Zusammenhang mit der Raumakustik auf die Sprachverständlichkeit zu erzeugen, wurden einige Hörproben erzeugt, in denen das Signal für ein Ohr um 20 dB bzw. um 40 dB abgeschwächt wurde. Damit wird eine teilweise Vertäubung eines Ohres, wie sie auch in Verbindung mit Erkrankungen des HNO-Bereichs auftreten kann, ungefähr nachgebildet. Komplexere Hörfehler, die mit starken Veränderungen der Kurven gleicher Lautstärke oder mit Dynamik-Einschränkungen verbunden sind, lassen sich soweit überhaupt möglich, nur mit sehr hohem Aufwand nachbilden.

Beim Anhören dieser Hörproben mit einem 'abgeschwächten' Ohr wird für 'Normalhörige' deutlich, welche Auswirkungen ein vollständiger oder teilweiser Ausfall des binauralen Richtungshörens auf die Sprachverständlichkeit hat. In diesem Raum bleibt die Sprachverständlichkeit ausreichend, ist aber gegenüber dem normalen binauralen Hören erheblich verschlechtert. Der entscheidende Abfall der Qualität ist dabei zwischen normalem Hören und 20 dB Abschwächung hörbar, der Schritt von 20 dB zu 40 dB Dämpfung hat weniger Effekt.

Auralisation der Gruppenarbeits-Situation

Die Hörproben zur Gruppenarbeit verdeutlichen die bereits numerisch beschriebenen Effekte. Die Sprachverständlichkeit ist in jeder Konfiguration zwischen allen untersuchten Positionen im Raum gut oder sehr gut. Lediglich die Lautstärke ist innerhalb einer Gruppe höher als von Sprechern in den Nachbargruppen. Die Absorber-Anordnung (Wände oder Decke) hat auch in den Hörproben nur geringen Einfluß.

Bei zusätzlichen Stellwänden im Raum fallen zwei Wirkungen auf: der Raum wird sehr 'trocken' und die Sprache von den Nachbartischen wird merklich leiser. Neben diesen beiden deutlichen Effekten ist der hörbare Unterschied zwischen den Absorber-Anordnungen etwas größer als ohne Stellwände.

3.4 Werkstatt und Speisesaal in den neuen Werkstätten für behinderte Menschen in Lindenberg / Allgäu

3.4.1 Beschreibung des Meßobjekts

Die im Jahr 2005 fertiggestellten 'neuen Werkstätten für behinderte Menschen' der Lebenshilfe Lindenberg / Allgäu sind eine Holzkonstruktion. Lediglich die Bodenplatte und ein Kern, der die Technikzentrale enthält, sind in Stahlbeton ausgeführt. Als thermische Speichermasse wirkt der verstärkte und thermisch aktivierte Betonestrich, über den sowohl geheizt als auch mit Grundwasser gekühlt wird³⁵.



Grafik 3.4.1. Außenansicht des Neubaus Behindertenwerkstatt Lebenshilfe in Lindenberg / Allgäu.

Dieses Meßobjekt stellt in zweierlei Hinsicht eine Besonderheit innerhalb des Projektes dar. Einmal liegt der Schwerpunkt der Messungen hier nicht auf Kommunikationsräumen, sondern auf einer Werkstätte und einem Speisesaal, beides Räume in denen Kommunikation fast ausschließlich im Nahbereich stattfindet, andererseits aber mit Lärmentwicklung gerechnet werden muß. Eine Schallausbreitung über den gesamten Raum ist hier also eher unerwünscht. Im Interesse der Lärminderung ist eine gute Bedämpfung des Raums wünschenswert. Nach der Klassifizierung in DIN 18041 gehören die Räume der Gruppe B an, für die in der Norm keine empfohlenen Nachhallzeiten festgelegt sind.

Als zweite Besonderheit sind in dem in Holzbauweise errichteten Gebäude keine massiven Betondecken vorhanden. Die Decken können hier also anders als in den übrigen untersuchten Gebäuden zur akustischen Bedämpfung genutzt werden.

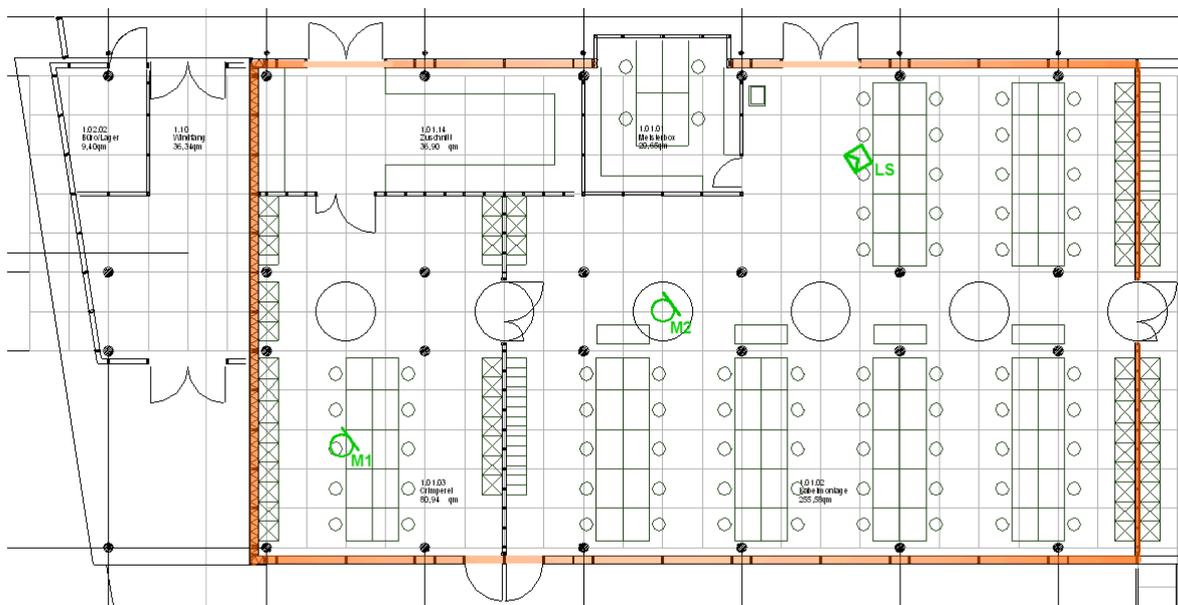
³⁵ Weitere Information zum Objekt befindet sich in der Solarbau-Dokumentation [Leb 2005]

3.4.2 Messungen in verschiedenen Räumen

Messung in einem Werkstattraum während des Innenausbaus

Bereits während der Innenausbau-Phase wurden in einem der Werkstattträume probe-weise Raumimpulsantworten gemessen³⁶. Diese Messung diente primär als Test, ob die an anderen Meßobjekten bereits bewährte meßtechnische Einrichtung auch in den relativ großen Räumen der Werkstätten verwendbar ist. Insbesondere galt es zu erproben, ob die abgestrahlte Schalleistung des verwendeten Lautsprecher-systems für Messungen in den größeren Räumen ausreicht. In dieser Hinsicht war die Testmessung erfolgreich. Es zeigte sich, daß die Meßeinrichtung für die Werkstattträume³⁷ geeignet ist.

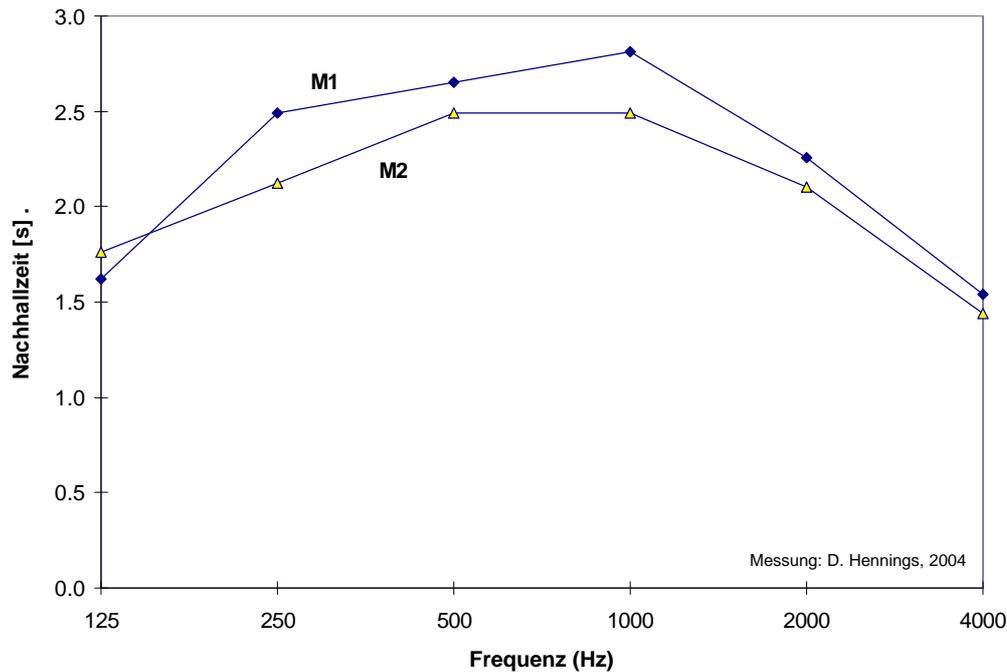
Der Raum befand sich zum Meßzeitpunkt noch inmitten des Innenausbaus; es fehlten noch einige Unterteilungen, so daß der vermessene Raum größer war als die daraus entstehenden Räume nach Fertigstellung. Wegen des unfertigen Zustands ermöglichen die Meßresultate nur sehr beschränkte Aussagen bezüglich des fertiggestellten Raums. Jedoch können sie helfen, ein Simulations-Modell zu adaptieren, da die Komplexität noch relativ gering ist. Die Messungen erfolgten mit geringstmöglichem Aufwand, Lautsprecher und Mikrofon auf dem Boden stehend, in diagonaler Richtung des Raums (vgl. Grafik 3.4.2) mit zwei unterschiedlichen Abständen zwischen Mikrofon und Lautsprecher.



Grafik 3.4.2. Grundriß des vermessenen Raums mit den Positionen von Lautsprecher (LS) sowie Mikrofon (M1 und M2). Die zum Meß-Zeitpunkt fertiggestellten Umschließungswände sind eingefärbt. Die Unterteilungen und die Möblierung waren noch nicht eingebaut.

³⁶ Anlässlich eines Besichtigungstermins, Sept. 2004

³⁷ Größe des gemessenen Raums: ca. 400 m² Grundfläche, ca. 1400 m³ Volumen



Grafik 3.4.3. Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Nachhallzeiten des unfertigen Werkstatttraums im Sprache-relevanten Spektralbereich für die Mikrofon-Positionen M1 und M2.

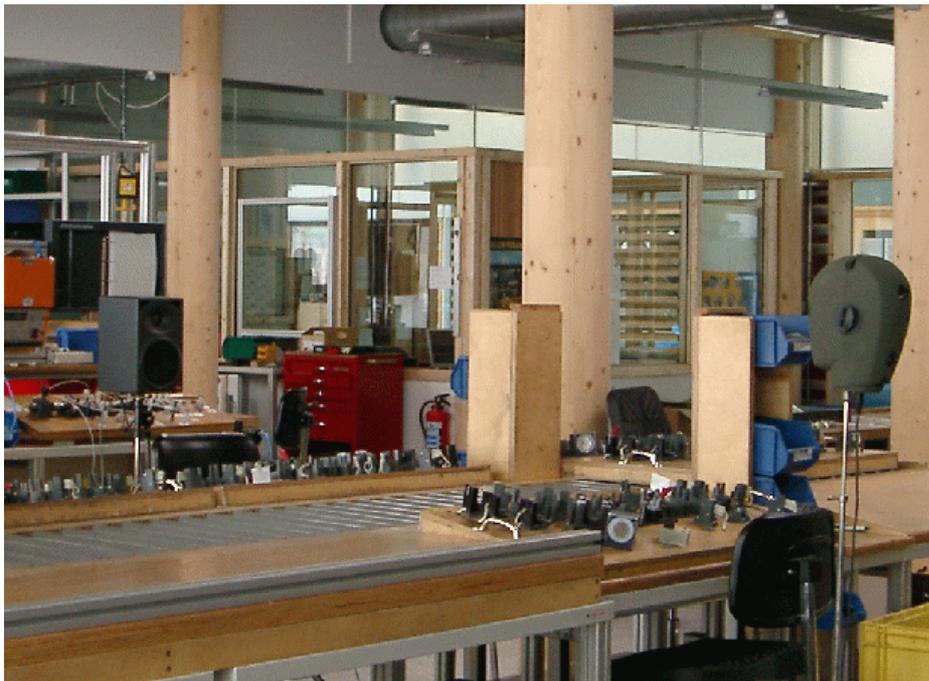
Die Ergebnisse dieser vorab-Messung zeigen im mittleren Frequenzbereich Nachhallzeiten über 2 s, teilweise über 2.5 s. Da der Raum noch durch Unterteilungen verkleinert wird, wird sich die Nachhallzeit aufgrund des Volumens etwas verringern (ca. 10%). Die größeren Änderungen sind aufgrund zusätzlicher Absorption durch Mobilar und durch das Vollenden des Innenausbau zu erwarten.

Nach DIN 18041 ist der Raum der Gruppe B (Räume mit Hörsamkeit im Nahbereich, und ggf. mit Lärmquellen) zugehörig, für die keine empfohlenen Nachhallzeiten festgelegt sind. Dennoch kann eine zusätzliche Bedämpfung sinnvoll sein, um sowohl den mittleren Lärmpegel zu senken als auch die Sprachverständlichkeit im Nahbereich zu verbessern. Eine Halbierung der Nachhallzeit geht dabei etwa auch mit einer Halbierung der mittleren Schalleistung einher, entsprechend einer Senkung des Schallpegels um 3 dB.

Messungen in der fertiggestellten Kabelmontage-Werkstatt

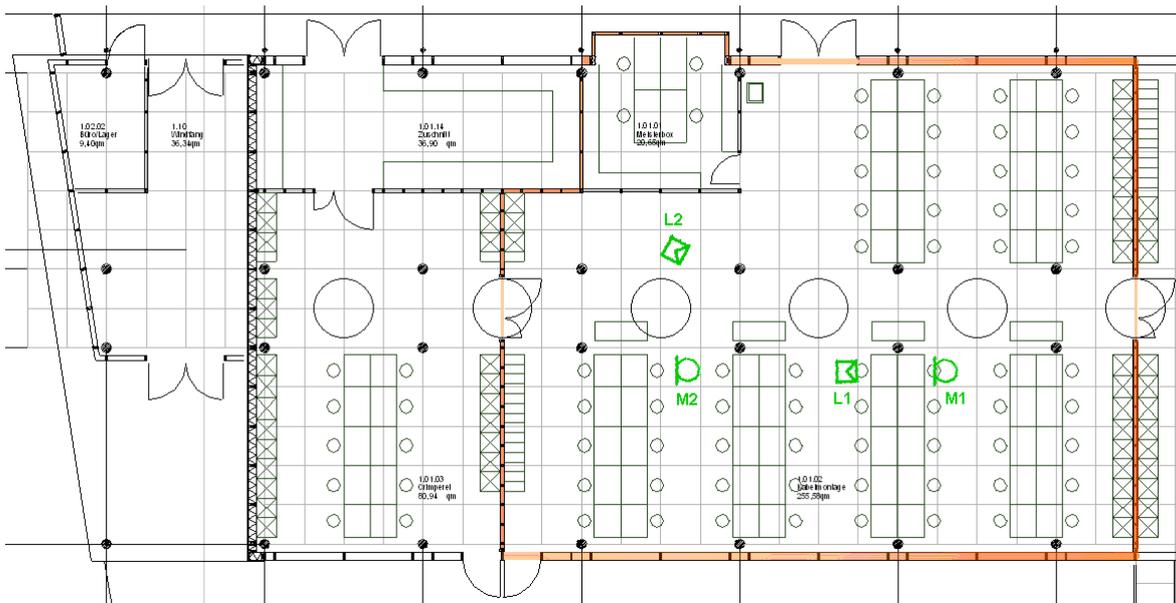
Nach Fertigstellung und Inbetriebnahme des Gebäudes erfolgten Messungen in der Kabelmontage-Werkstatt als 'Repräsentant' für die Werkstatträume (Raum 1.01.02). In der Werkstatt waren insbesondere zwei Nutzungs-Situationen im Meßaufbau nachgebildet:

- Kommunikation im Nahbereich zwischen zwei einander gegenüberliegenden Arbeitsplätzen als Beispiel für die erwünschte Schallübertragung (vgl. Grafik 3.4.4).
- Übertragung zwischen zwei auseinanderliegenden Punkten im Raum, Abstand etwa die Hälfte der größten Raumabmessung. Über diese Entfernung ist eine gute Schallübertragung in diesem Raum unerwünscht.



Grafik 3.4.4 Ein Meßaufbau in der Werkstatt, der eine Gesprächssituation zwischen einander gegenüberliegenden Arbeitsplätzen nachbildet (Positionen L1 und M1).

Grafik 3.4.5 zeigt den Grundriß der Werkstatt mit eingetragenen Lautsprecher- und Mikrofon-Positionen.

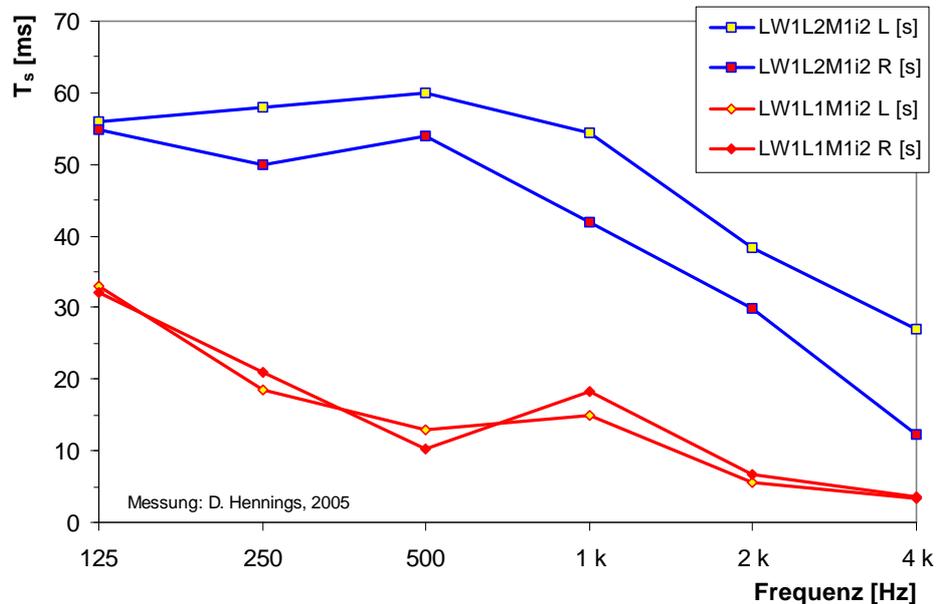
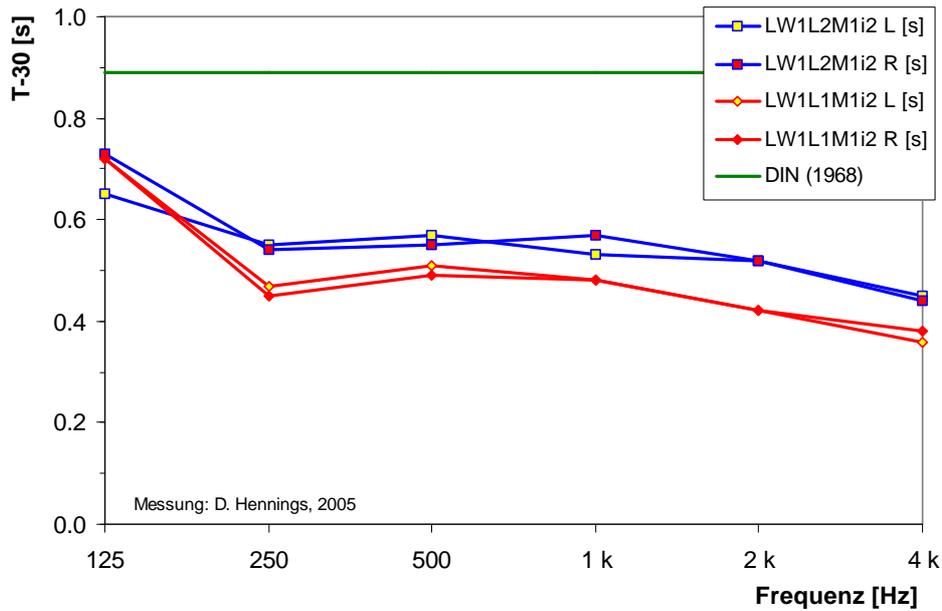


Grafik 3.4.5 Grundriß der Kabelmontage-Werkstatt mit den Lautsprecher-Positionen L1 und L2 sowie den Mikrofon-Positionen M1 und M2. Die Umschließungswände des vermessenen Raums sind eingefärbt. Die tatsächliche Möblierung weicht etwas von der Zeichnung ab. Die Lautsprecher- und Mikrofon-Positionen sind bezogen auf die Möblierung richtig eingezeichnet und können daher ebenfalls von den tatsächlichen Positionen geringfügig abweichen.

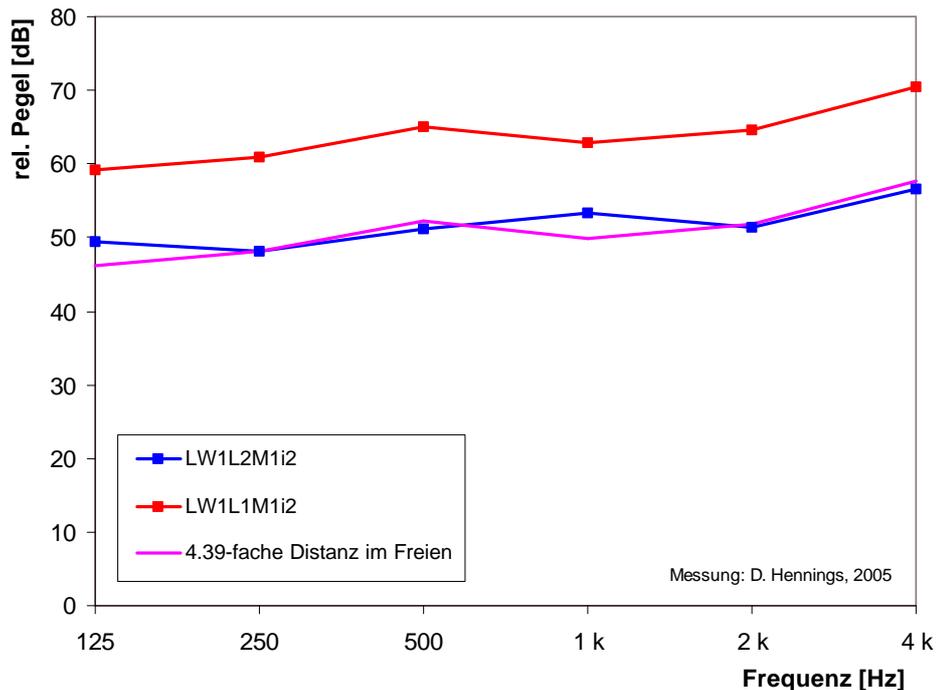
In Grafik 3.4.6 sind aus den gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete T_{30} -Nachhallzeiten und Schwerpunktzeiten für die Oktavbänder mit 125 Hz bis 4 kHz Mittenfrequenz dargestellt. In den Nachhallzeiten zeigt sich, daß der vor Fertigstellung noch recht hallige Raum nun eher stark bedämpft ist. Die Nachhallzeiten liegen deutlich unter der Empfehlung der zum Planungszeitpunkt noch gültigen alten DIN 18041 für die Raumgröße. Die Reduktion der Nachhallzeit ist vermutlich größtenteils auf die sehr komplexe Einrichtung und Ausstattung mit Arbeitshilfen und Material zurückzuführen. Da für diese Objekte keine Schallabsorptionsdaten vorliegen, können dazu nur plausible Annahmen gemacht werden.

Die Nachhallzeiten für den Nahbereich (ca. 2 m) und den Distanzbereich (ca. 10 m) unterscheiden sich nicht wesentlich. In den Schwerpunktzeiten ist dagegen ein deutlicher Unterschied. Im Nahbereich sind die Werte sehr gering, was einer sehr guten Sprachübertragung entspricht, im Distanzbereich liegen die Werte ebenfalls unter der Obergrenze für Sprachübertragung (80 ms), so daß auch hier eine befriedigende Sprachverständigung möglich ist, vorausgesetzt der allgemeine Lärmpegel ist nicht zu hoch³⁸.

³⁸ Über die typischen Lärmpegel in der Werkstatt liegen keine Daten vor, da die Messungen außerhalb der Betriebszeiten erfolgen sollten.



Grafik 3.4.6 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Qualitätsmaße der Kabelmontage-Werkstatt im Sprache-relevanten Spektralbereich, oben die T_{30} -Nachhallzeiten, unten Schwerpunkzeiten (T_s). Zum Vergleich ist die (für Räume der Gruppe A) empfohlene Nachhallzeit der im Planungszeitraum noch gültigen DIN 18041 (1968) eingezeichnet. Der Vergleich zeigt, daß der Raum stark bedämpft ist und für seine Größe kurze Nachhallzeiten aufweist. Die Positionen von Schallquelle und Mikrophon entsprechen einem Gespräche zwischen zwei gegenüberliegenden Arbeitsplätzen (Abstand ca. 2 m, rote Kurven) und einer größeren Entfernung (ca. 10 m, blaue Kurven). Jede Messung für den linken (L) und rechten (R) Kanal des Kunstkopf-Mikrofons.



Grafik 3.4.7 Gemessene relative Schallpegel in der Kabelmontage-Werkstatt im Nahbereich (LW1L1M1i2) und im Distanzbereich (LW1L2M1i2) bei gleich lauter Schallquelle. Zum Vergleich die berechnete Abschwächung des Nahbereichs-Signals in der Distanzbereichs-Entfernung im Freien.

Wegen der Lärmentwicklung in der Werkstatt, ist anders als in Kommunikations-Räumen hier eine schnelle Abschwächung des Schalls mit der Entfernung wünschenswert. In Grafik 3.4.7 sind die relativen³⁹ Schallpegel zweier Messungen mit um einen Faktor 4.39 verschiedener Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrofon ('Nahbereich' und 'Distanzbereich') aufgetragen. Im freien Schallfeld mit punktförmiger Schallquelle ergibt eine 4.39-fache Entfernung eine Abschwächung des Signals um 12.85 dB. In der Grafik ist diese Abschwächung bezogen auf die nahe Schallquelle zusätzlich eingetragen und fällt nahezu mit der Pegelkurve der entfernteren Schallquelle zusammen. Der Schallpegel fällt also in der Werkstatt wie im Freien etwa mit 6 dB pro Verdopplung der Entfernung ab. Das bedeutet unter anderem:

- reflektierte Signale tragen nur unwesentlich zum Pegel bei
- eine stärkere Abschwächung mit der Entfernung ist nur mit Unterbrechung der direkten Schallwege möglich.

Der Raum liegt also nahe am Optimum dessen, was ohne Unterteilung des Raums möglich ist, was eine minimale Lärmausbreitung angeht. Wenn dieses Niveau erreicht ist, läßt sich der Lärm nur durch Reduzieren oder Abschirmen der Quellen weiter senken.

³⁹ 'relativ' bedeutet hier, daß zwar weder Schallquelle noch Mikrofon absolut geeicht waren, jedoch wurden alle Messungen in einem Raum mit den gleichen Pegelinstellungen vorgenommen, so daß sie untereinander vergleichbar sind.

Messungen im Speisesaal

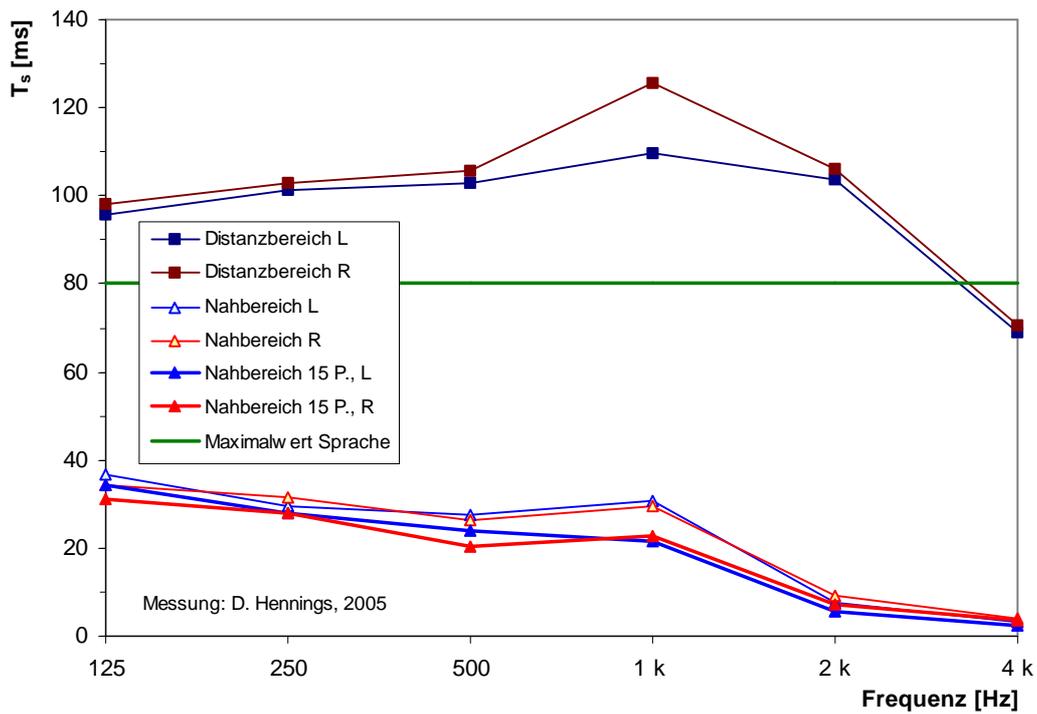
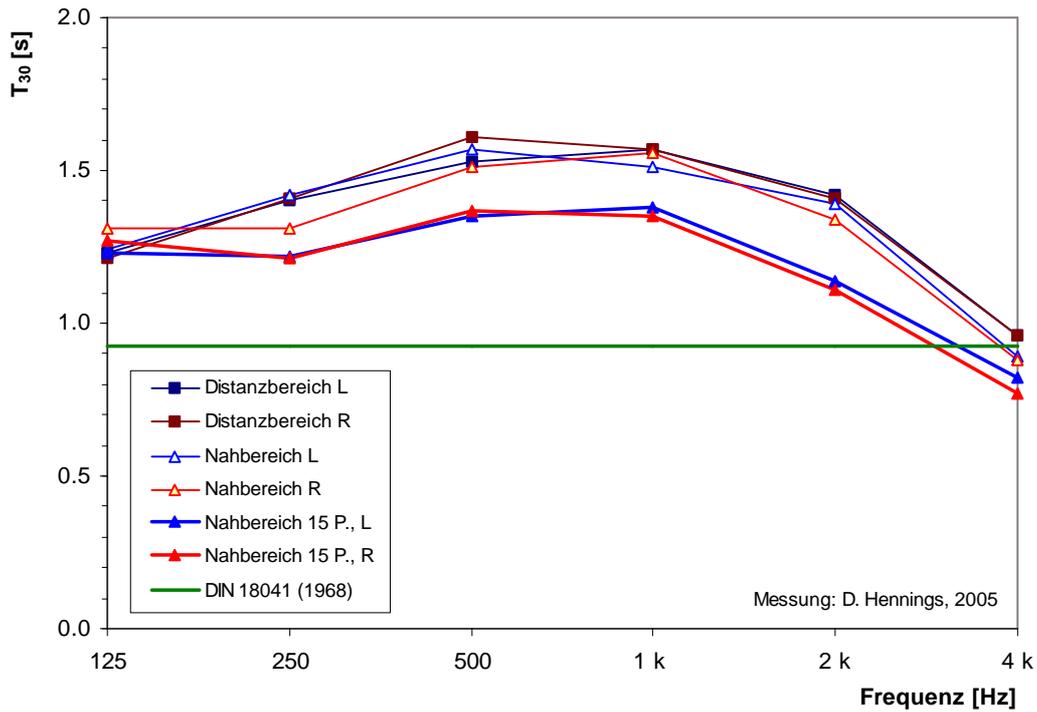
Der Speisesaal der 'Werkstätten' erstreckt sich zusammen mit einer Galerie über zwei Etagen und kann etwa 100 Personen aufnehmen.



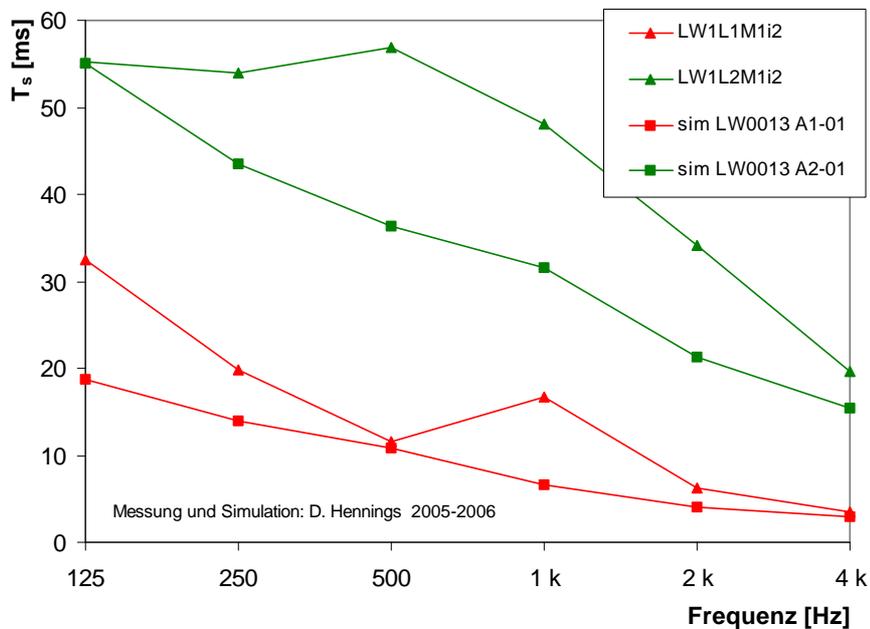
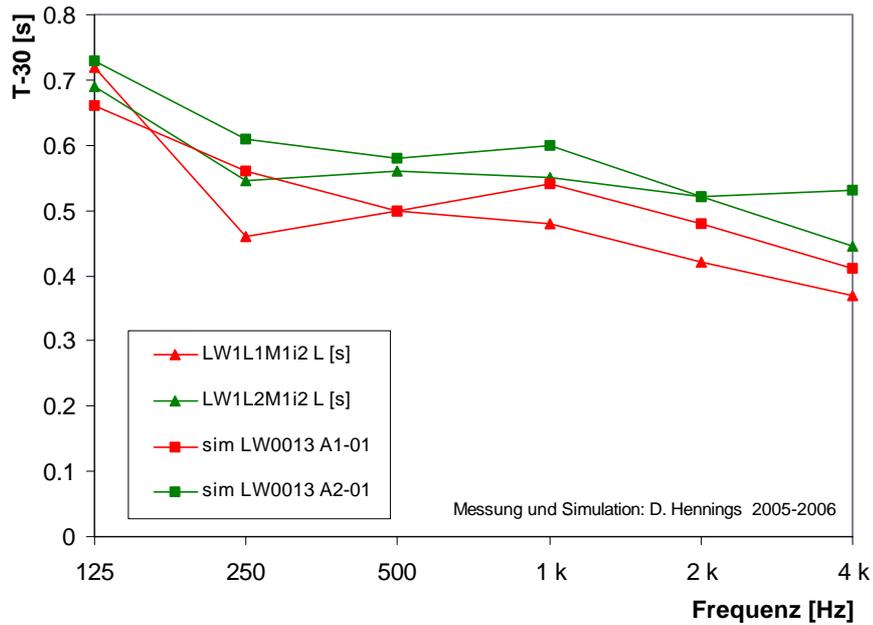
Grafik 3.4.8 Meßanordnung, die eine Gesprächs-Situation am Tisch im Speisesaal nachbildet.

Im Speisesaal wurde eine Gesprächs-Situation im Nahbereich an einem Tisch als Meßaufbau nachgebildet (Grafik 3.4.8), sowie die Übertragungsqualität im Distanzbereich gemessen, indem der Lautsprecher zwei Tischreihen weiter entfernt und abgewendet aufgestellt wurde. Die Nahbereichs-Messung wurde wiederholt, während 15 Personen an anderen Tischreihen im Raum saßen. In Grafik 3.4.9 sind Nachhallzeiten und Schwerpunktzeiten aus diesen Messungen dargestellt.

Die Nachhallzeiten des leeren Raums zeigen ein Maximum von rund 1.5 s bei mittleren Frequenzen und leichtem Abfall zu tiefen und hohen Frequenzen. Mit 15 Personen sinken die Nachhallzeiten um rund 0.2 s. Die Schwerpunktzeiten zeigen einen großen Effekt des Abstands zwischen Quelle und Empfänger. Die Werte im Nahbereich liegen bei tiefen Frequenzen um 30 bis 40 ms und sinken zu hohen Frequenzen hin auf sehr niedrige Werte. Die Besetzung hat nur einen geringen Effekt auf die Schwerpunktzeiten.

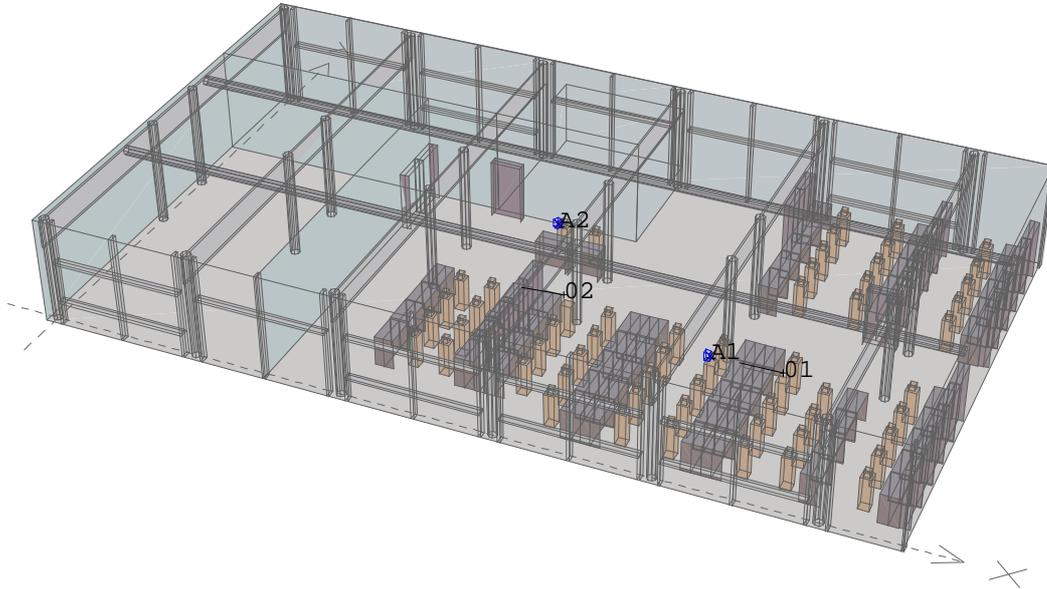


Grafik 3.4.9 Aus gemessenen Raumimpulsantworten abgeleitete Nachhallzeiten (oben) und Schwerpunktzeiten (unten) des Speisesaals. Kurven für den Nahbereich (Gespräch am Tisch) und den Distanzbereich im leeren Raum; zusätzlich für den Nahbereich mit 15 Personen im Raum.



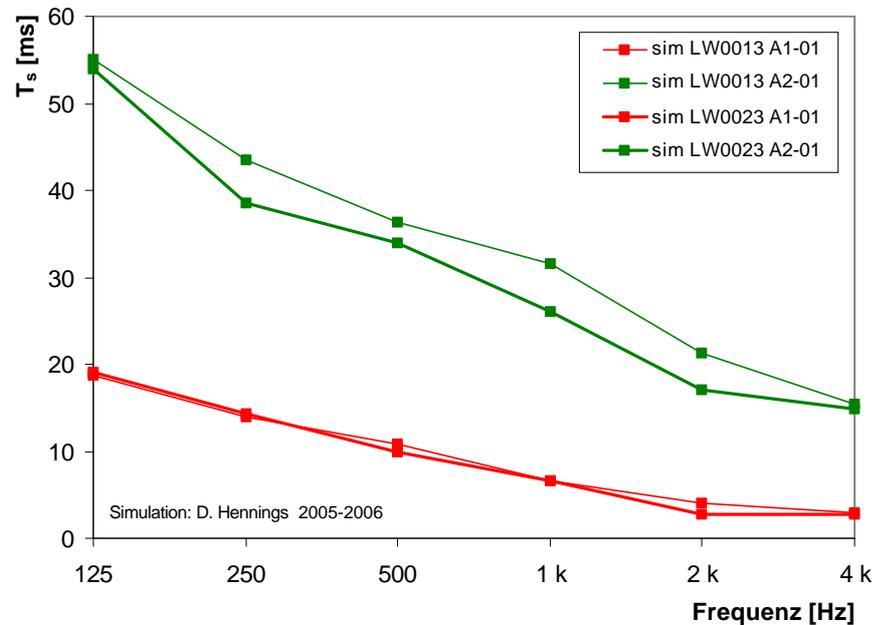
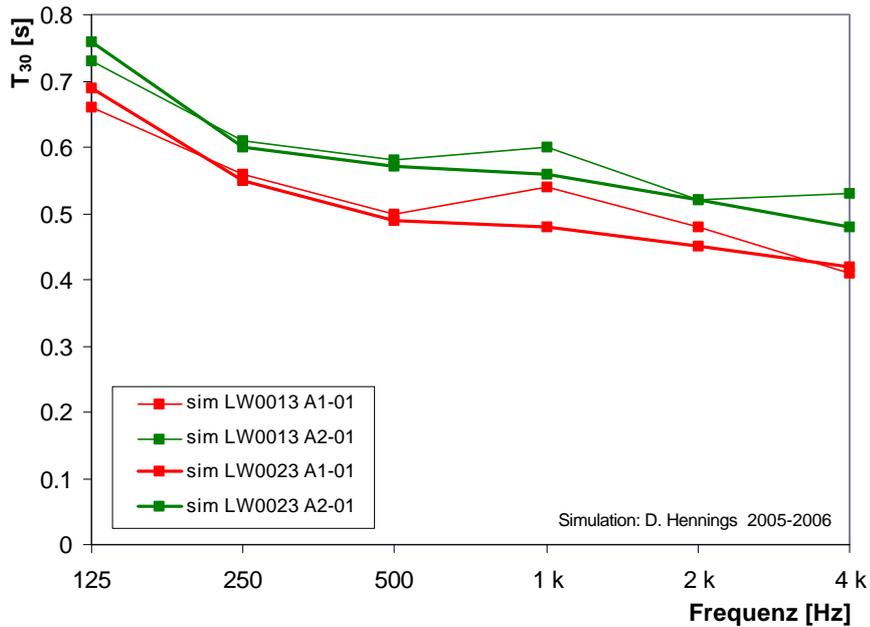
Grafik 3.4.11. Ergebnisse des angepassten Simulations-Modells der Kabelmotage-Werkstatt im Vergleich zu den entsprechenden Meßergebnissen, oben die T₃₀-Nachhallzeiten unten die Schwerpunktzeiten. Die roten Kurven beziehen sich auf den Nahbereich, die grünen auf den Distanzbereich. Die dreieckigen Symbole markieren Meßergebnisse, die quadratischen Symbole Simulationsergebnisse.

In weiteren Simulations-Läufen wurde die Kabelmontage-Werkstatt im besetzten Zustand untersucht, was meßtechnisch nicht möglich war, da die Messungen außerhalb der Betriebszeit der Werkstätten am Wochenende stattfanden, um gegenseitige Beeinträchtigungen von Messung und Betriebsablauf auszuschließen.



Grafik 3.4.12. Das Geometrie-Modell der Kabelmontage-Werkstatt mit 58 Personen im Raum.

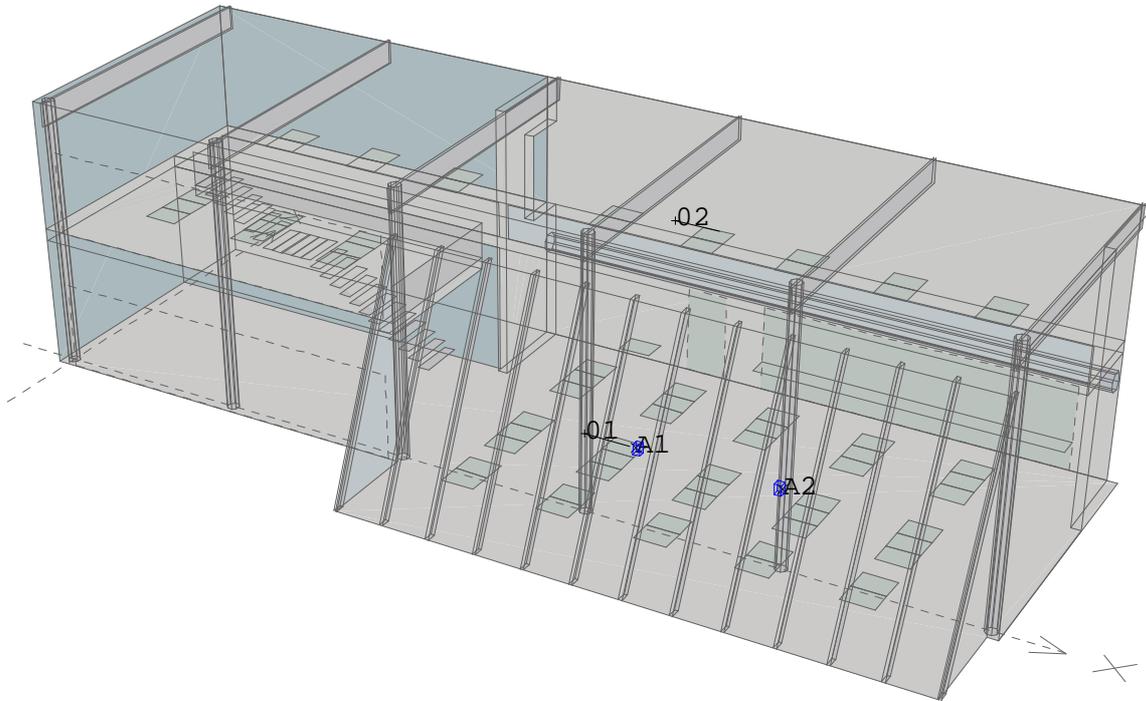
Die Ergebnisse der Simulationen der Kabelmontage-Werkstatt mit 58 Personen im Raum (Grafik 3.4.13) zeigen wenig Unterschiede zum unbesetzten Raum, also geringen Einfluß der Personen. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß der Raum bereits unbesetzt stark bedämpft ist und deshalb die zusätzliche Absorption durch die Personen keine wesentliche Rolle mehr spielt.



Grafik 3.4.13. Simulations-Ergebnisse für die Kabelmotage-Werkstatt im unbesetzten Zustand (dünne Kurven) und mit 58 Personen besetzt (fette Kurven); oben die T_{30} -Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten. Die roten Kurven beziehen sich auf den Nahbereich, die grünen auf den Distanzbereich.

Simulation des Speisesaals

Grafik 3.4.14 zeigt die Geometrie des Simulationsmodells des Speisesaals. Die Öffnung im Erdgeschoß zur dahinter liegenden Küche ist geschlossen, was dem Zustand während der Messungen entspricht. Das Modell bildet die Meß-Situation mit Sprecher- und Hörer-Positionen im Erdgeschoß nach mit einer zusätzlichen Hörer-Position auf der Empore.

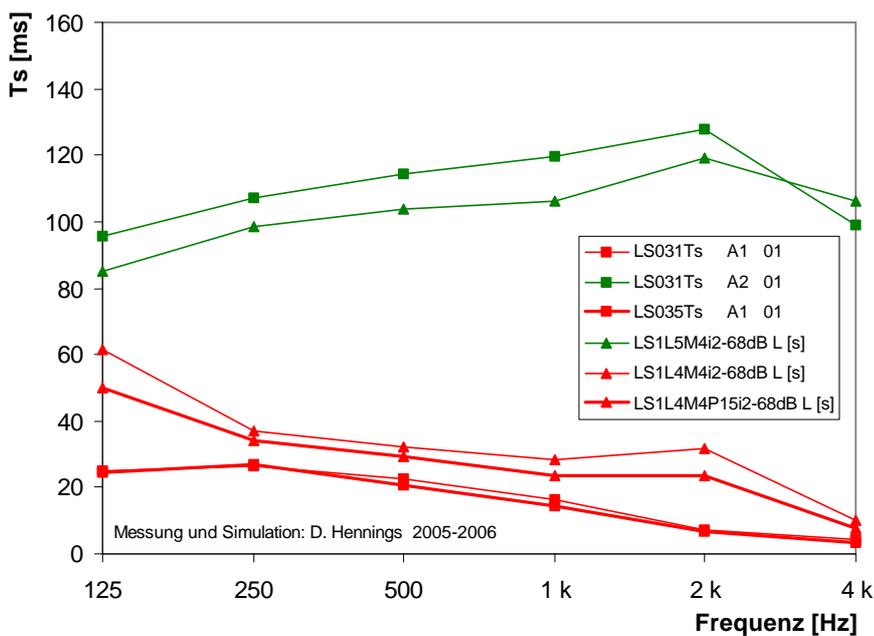
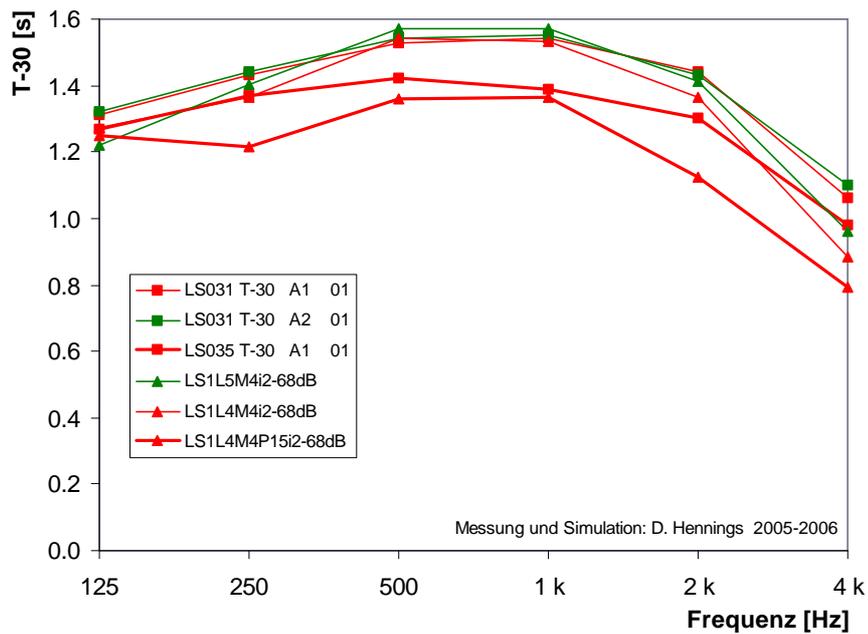


Grafik 3.4.14. Das Geometrie-Modell des Speisesaals ohne Personen.

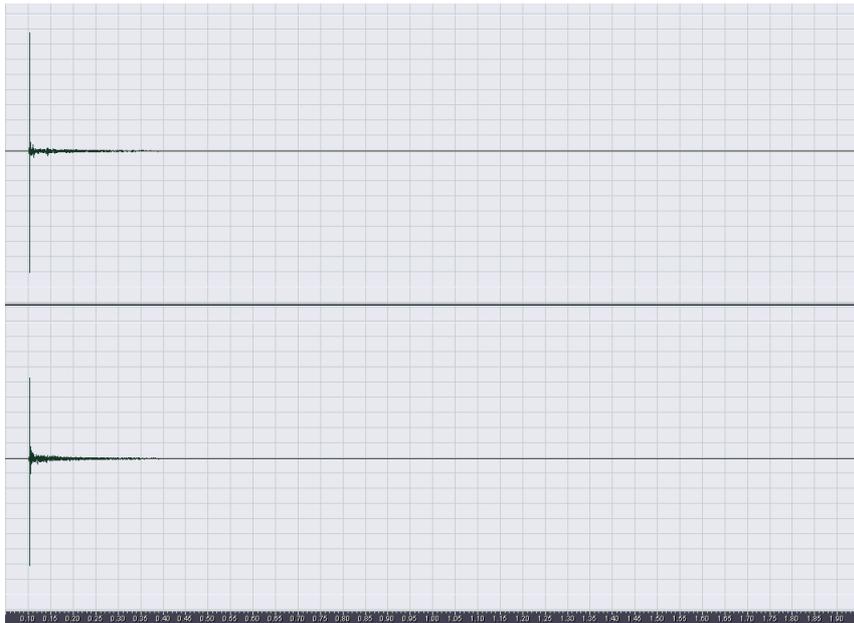
In Grafik 3.4.15 sind Ergebnisse des angepassten Modells im Vergleich zu Meßergebnissen dargestellt. Die Übereinstimmung von Meß- und Simulations-Ergebnissen ist sowohl bei Nachhallzeiten als auch bei Schwerpunktzeiten recht gut. Eine Ausnahme bilden die Nachhallzeiten mit 15 Personen Besetzung, wo die Wirkung der Personen in einigen Frequenzbändern in der Messung deutlich größer ist als in der Simulation. Bei tiefen Frequenzen ist eine Veränderung der Raummoden durch die Personen, die im Simulations-Modell nicht nachgebildet werden kann, eine mögliche Ursache der Abweichungen. Bei hohen Frequenzen kann die Temperatur- und Feuchte-Abhängigkeit der Luft-Absorption des Schalls eine Teil-Erklärung für Diskrepanzen sein. Die Luft-Temperatur variierte während der Messungen zwischen 19°C und 23°C, abhängig von der Einstrahlung durch die verglaste Fassade. Die relative Feuchte lag um 30%. Die Simulationen erfolgten mit der Annahme 20°C und 30% RF.

Es muß aber auch erwähnt werden, daß eine Messung der T_{30} -Nachhallzeit im Nahbereich⁴⁰ problematisch sein kann, wenn wie in diesem Raum ein starkes Direktschall-Signal von einem etwa 20 dB schwächer einsetzenden Nachhall gefolgt wird (Grafik 3.4.16).

⁴⁰ Als Grenze des Nahbereichs kann der Hallradius gelten, bei dem Direktschall und Nachhall gleiche Anteile am gesamten Schalldruck haben. Im Speisesaal liegt der Hallradius bei 2 m.

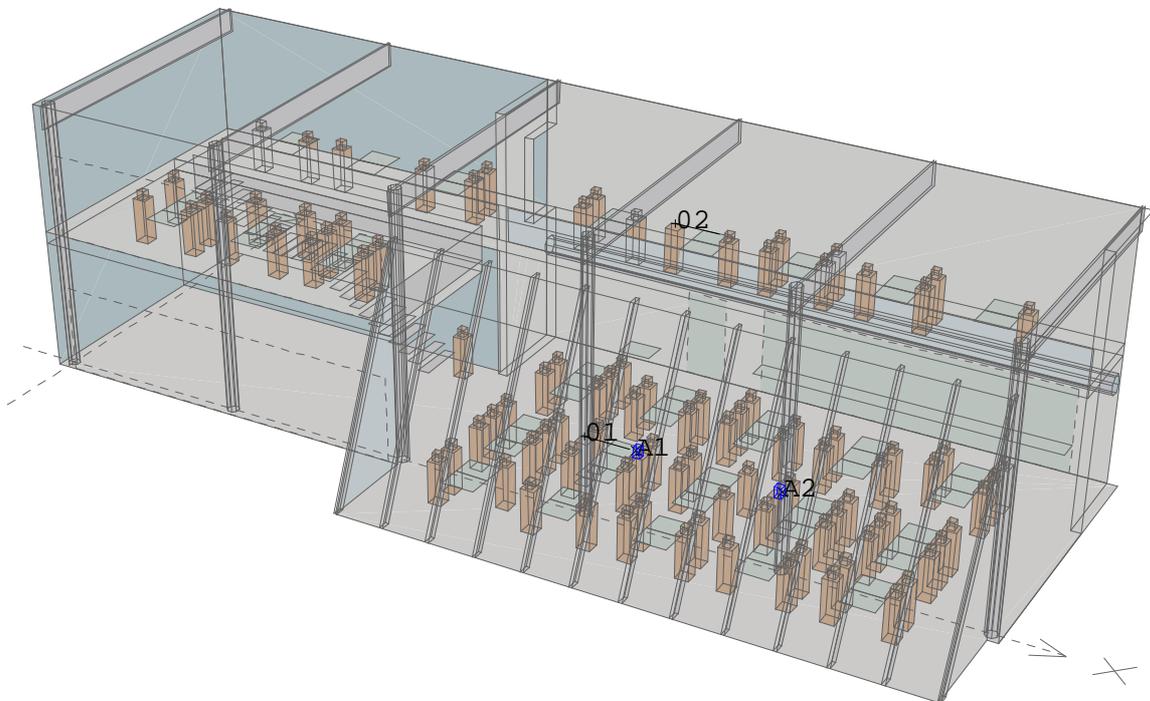


Grafik 3.4.15. Ergebnisse des angepassten Simulations-Modells (dreieckige Symbole) des Speisesaals im Vergleich zu den entsprechenden Meßergebnissen (quadratische Symbole), oben die T30-Nachhallzeiten, unten die Schwerpunktzeiten. Die roten Kurven beziehen sich auf den Nahbereich, die grünen auf den Distanzbereich. Die dreieckigen Symbole markieren Meßergebnisse, die quadratischen Symbole Simulationsergebnisse. Die dünnen Kurven entsprechen dem unbesetzten Zustand, die fetteren Kurven dem mit 15 Personen besetzten Raum.

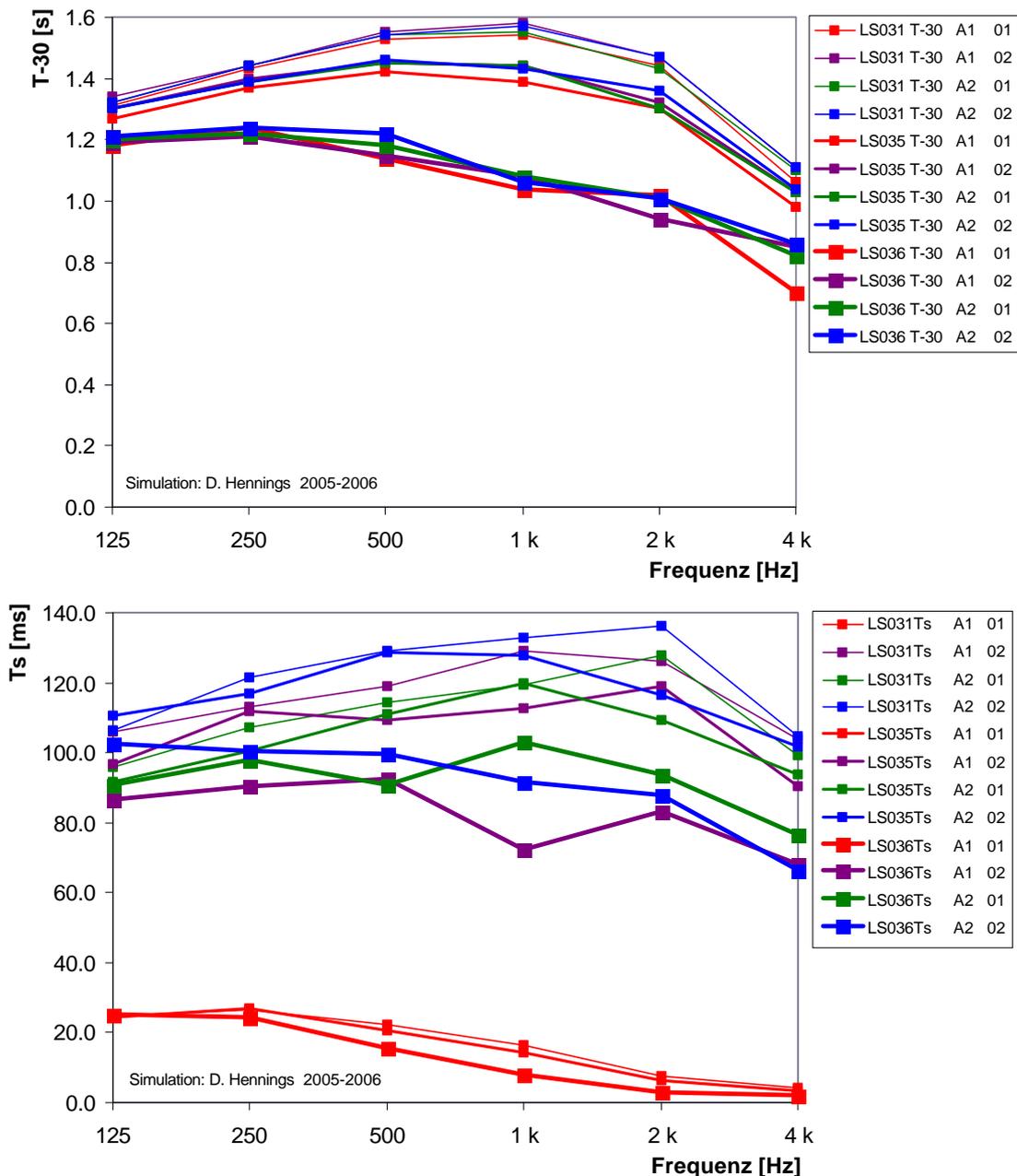


Grafik 3.4.16. Beispiel für eine gemessene Raumimpulsantwort im Nahbereich des Speisesaals für den linken und den rechten Kanal des Kunstkopfmikrofons.

Mit dem Simulationsmodell wurde der Einfluß einer stärkeren Besetzung des Raums modelliert. Grafik 3.4.17 zeigt das Geometrie-Modell des mit 100 Personen besetzten Speisesaals. Die Resultate sind in Grafik 3.4.18 dargestellt. In den T_{30} -Nachhallzeiten zeigt sich deutlich die zunehmende Bedämpfung des Raums durch die Personen. Die Schwerpunktzeiten sind dagegen in erster Linie von den Positionen von Schallquelle und Mikrofon bestimmt, bei relativ wenig Einfluß der Bedämpfung.



Grafik 3.4.17. Das Geometrie-Modell des mit 100 Personen besetzten Speisesaals.



Grafik 3.4.18. Die Auswirkung einer starken Besetzung auf die raumakustischen Eigenschaften des Speisesaals im Simulation-Modell, oben T_{30} -Nachhallzeiten, unten Schwerpunktzeiten, jeweils für verschiedene Positionen von Schallquelle und Mikrofon. Die roten kurven entsprechen der Gesprächs-Situation im Nahbereich, alle übrigen liegen im Distanzbereich. Die Strichstärke der Kurven entspricht der Besetzung des Raums: dünne Kurven für den leeren Raum, mittelstarke für 15 Personen und fette Kurven für 100 Personen Besetzung.

3.4.5 Auralisation der Räume

Auralisation der Kabelmontage

Mittels gemessener Impulsantworten sowie aus Simulations-Ergebnissen wurden Sprach-Hörproben hergestellt. Gemeinsam ist den Meß- und den Simulations-Hörproben, daß sie die recht 'trockene' Akustik des Raums gleichartig wiedergeben. Auch die deutlichen Entfernungs-abhängigen Lautstärke-Unterschiede zwischen Nah- und Distanzbereich werden in gemessenen und simulierten Hörproben sehr ähnlich hörbar. Unterschiede sind hörbar in der Klang-Färbung der Sprache und in der Räumlichkeit der Hörproben. In den simulierten Hörproben wird auch deutlich, daß sich die akustischen Eigenschaften des schon stark bedämpften Raums bei voller Besetzung nicht wesentlich verändern.

Eine Einschränkung der Realitätsnähe sowohl der gemessenen als auch der simulierten Hörproben ist das Fehlen der Betriebsgeräusche bzw. des Betriebslärms. Da die Messungen außerhalb der Betriebszeiten der Werkstätten am Wochenende erfolgten, liegen keine Messungen oder Aufnahmen der Betriebsgeräusche vor.

Bezogen auf die Simulation entspricht dies allerdings genau einer Planungs-Situation, wo ein gemessenes oder aufgenommenes Betriebsgeräusch noch nicht vorliegen kann.

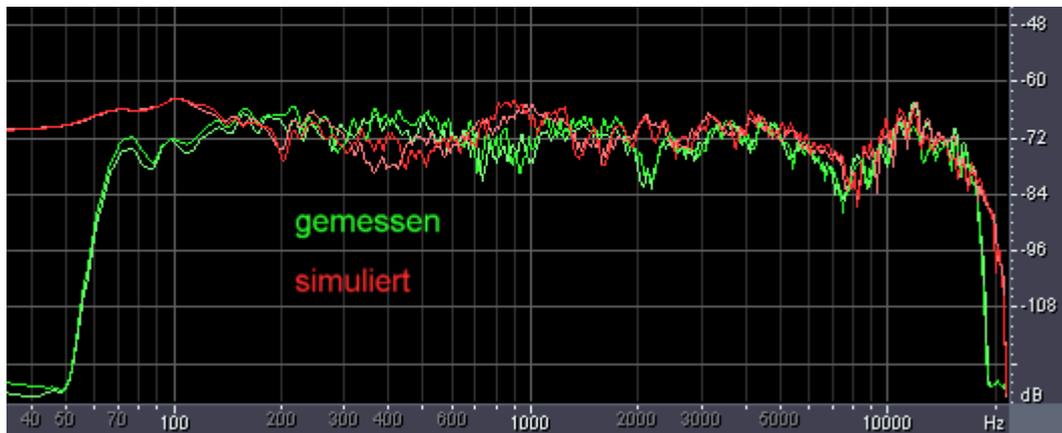
Tab. 3.4.1 Einige Hörproben zu den neuen Werkstätten Lindenberg⁴¹

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
75	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	mess
76	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung	mess
78	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	sim
79	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung	sim
80	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 58 P.	sim
81	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung, 58 P.	sim
82	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	mess
83	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, abgew.	mess
85	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	sim
86	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, abgew.	sim
93	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 100 P.	sim
94	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, 100 P. , abg	sim

⁴¹ Weitere Hörproben sind in der Übersicht in Anhang 2 aufgeführt.
Die Nummern der Hörproben beziehen sich auf diese Übersicht.

Auralisation des Speisesaals

Zum Speisesaal wurden ebenfalls Hörproben aus gemessenen und simulierten Impulsantworten hergestellt. Im Hörvergleich zeigt sich, daß der Unterschied zwischen Nahbereich und Distanzbereich in den 'gemessenen' und den 'simulierten' Hörproben in sehr ähnlicher Weise wiedergegeben wird. Die Unterschiede in der Lautstärke und in der Sprachübertragungs-Qualität lassen sich also mit der simulierten Auralisation gut prognostizieren. Demnach ist die Sprachübertragung im Nahbereich sehr klar, wogegen die Übertragung im Distanzbereich leise und verwaschen ist. Die Klarheit in der Nähe und Verwaschenheit in der Distanz entspricht der sehr unterschiedlichen Bewertung mit der Schwerpunktzeit, wogegen die Nachhallzeiten nur kleine Unterschiede zeigen. Allerdings sind auch Klangfarben-Unterschiede zwischen 'gemessen' und 'simuliert' hörbar. Grafik 3.4.19 zeigt die entsprechenden Spektren zweier Impulsantworten, mit denen dasselbe trockene Sprachsignal gefaltet wurde.



Grafik 3.4.19. Spektren der 'gemessenen' und der 'simulierten' Raumimpulsantworten für den Nahbereich im Speisesaal. Die ungefähr übereinstimmenden Frequenz-Charakteristiken oberhalb 2.5 kHz geben in erster Linie die Übertragung des Kunstkopfes bei frontalem Schalleinfall wieder. Die Unterschiede unterhalb 1 kHz bis herab zu etwa 80 Hz können als Ursache für die hörbaren Klangunterschiede gelten. Der durch die untere Grenzfrequenz des Lautsprechers bedingte starke Abfall des gemessenen Signals unterhalb 65 Hz spielt für Sprache keine nennenswerte Rolle, da er unterhalb des Grundtonbereichs von Männerstimmen liegt. Der Simulations-Frequenzgang unterhalb des 128 Hz-Oktavbandes (Untergrenze 90 Hz) ist ein Artefakt, da die tiefen Frequenzen nicht simuliert werden, sondern bei der Auralisation extrapoliert werden.

4. Objekt-übergreifende Auswertung

4.1. Planungs-Aspekte

4.1.1 Sprach-Übertragungsqualität

In drei Objekten wurden Räume untersucht, deren primäre Nutzungsarten raumweite Kommunikation und damit eine sehr gute raumweite Sprachübertragung erfordern. Die Messungen einem Objekt (GMS Biberach) haben gezeigt, daß bei guter raumakustischer Planung in Kommunikationsräumen mit Schallharter Decke eine sehr gute Sprachübertragungsqualität erreichbar ist. Die beiden anderen Objekte (BOB-Aachen und ZUB-Kassel) waren bis Projektabschluß in raumakustischer Hinsicht noch nicht fertiggestellt und zeigten noch eine unzureichende raumakustische Qualität. Mit Hilfe der Simulation konnten hier Wege zur erheblichen Verbesserung aufgezeigt werden.

Die Ergebnisse zeigen auch den erheblichen Einfluß der Besetzung auf die Nachhallzeiten und die Übertragungsqualität. Bei Räumen, die mit sehr unterschiedlicher Besetzung genutzt werden, wie es für viele Kommunikationsräume typisch ist, genügt es nicht nur einen Besetzungs-Zustand zu optimieren, sondern es muß der Bereich von minimaler bis maximaler vorkommender Besetzung bei der Auslegung der akustischen Bedämpfung berücksichtigt werden.

In Räumen mit Kommunikation im Nahbereich (DIN-Gruppe B) sind für die Beurteilung der Übertragungsqualität die Schwerpunktzeit oder andere Maße für die Deutlichkeit erforderlich, die Nachhallzeit ist dagegen ungeeignet⁴².

4.1.2 Kommunikationsräume mit schallharter Decke

Wie schon in [Hennings, 2002] gezeigt, ist die schallharte Decke für raumweite Kommunikation vorteilhaft gegenüber einer schallabsorbierenden Decke, sofern der Raum über andere Flächen genügend bedämpft ist. Dies kann auch als eine Anpassung der Empfehlungen der DIN 18041 für Räume der Gruppe A an die zusätzlichen Anforderungen der passiven Klimatisierung oder Bauteilaktivierung gesehen werden. In der DIN wird empfohlen, den mittleren Deckenbereich schallhart auszuführen. Für die passive Klimatisierung sind möglichst große Oberflächen der speicherfähigen Bauteile, hier der Raumdecke vorteilhaft. Von einer schallharten Ausführung auch der Randbereiche der Decke sind gegenüber der DIN-Empfehlung raumakustisch weder Vorteile noch Nachteile zu erwarten, sofern der Raum anderweitig gut bedämpft ist, vorzugsweise an den Wänden. Bei zueinander parallelen und wenig strukturierten Wänden beugt eine Bedämpfung außerdem eventuellen Flatterechos vor.

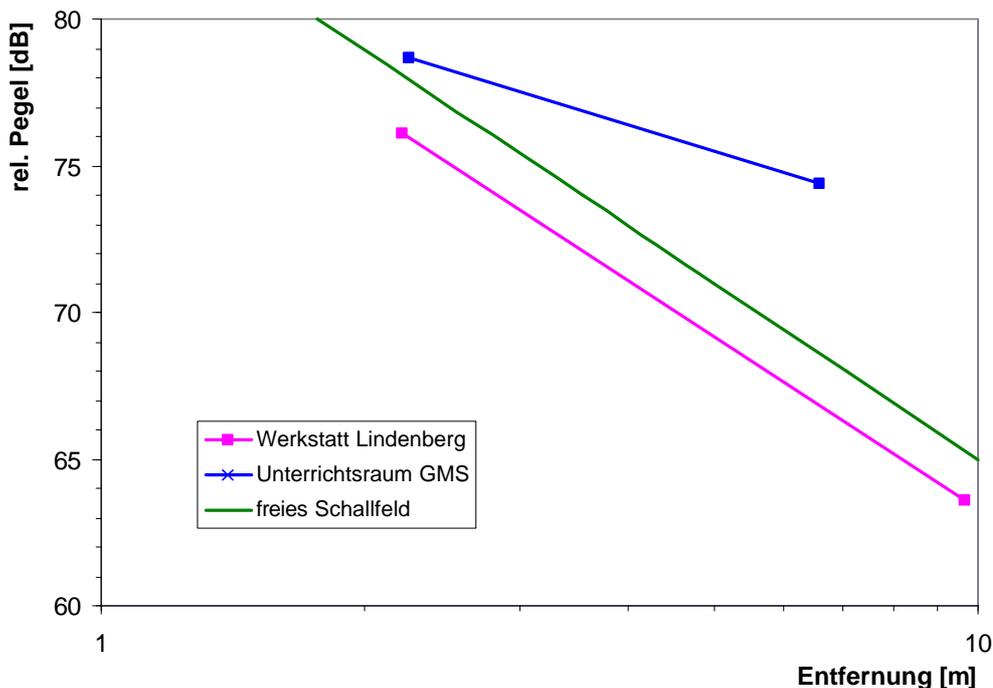
⁴² Bei halligen Räumen kann der 'Hallradius' genutzt werden, um den maximal für Nahbereichskommunikation geeigneten Bereich abzuschätzen. Der 'Hallradius' gibt diejenige Entfernung von einer Schallquelle an, bei der Direktschall und diffuser Nachhall gleich laut sind. Bei den meisten Räumen liegt der Hallradius im Bereich weniger Meter.

4.1.3 Konflikt bei Vollverglasung

Das Objekt ZUB-Kassel weist auf die Möglichkeit eines Mangels an Oberflächen, die für Schallabsorber zur Verfügung stehen. Während beim ZUB der Flächen-Mangel durch den experimentellen Charakter des Gebäudes bedingt ist, erzeugt die 'zeitgeistige' Architektur mit dem Trend, nicht nur Fassaden, sondern auch Innenwände voll zu verglasen, ebenfalls Räume, die an den Umschließungsflächen nicht ausreichend bedämpft werden können. Da die weitgehende Verglasung nicht nur akustisch, sondern auch thermisch und optisch von Nachteil ist⁴³, kann eine Optimierung dieser Räume nur in einer Reduzierung der Glasflächen auf ein der Nutzungsart angemessenes Maß bestehen.

4.1.4 Schallausbreitung im Raum

Je nach Nutzungsart ist eine sehr gute Schallausbreitung im Raum (Kommunikationsräume) oder eine schnelle Abschwächung des Schalls mit der Entfernung von der Schallquelle (z.B. bei Lärm) erwünscht. Das hier konstruktiv in die eine oder andere Richtung optimiert werden kann, zeigt ein Vergleich der Entfernungs-abhängigen Abschwächung des Schalls in zwei der Meß-Objekte (Grafik 4.1.1).



Grafik 4.1.1. Entfernungs-Abhängigkeit des Schallpegels: Im Werkstattraum entspricht die Pegel-Abnahme mit nahezu 6 dB pro Entfernungs-Verdopplung einem freien Schallfeld mit punktförmiger Schallquelle. Im Unterrichtsraum der Gebhard-Müller-Schule nimmt der Pegel nur um etwa 3 dB pro Entfernungs-Verdopplung ab und verhält sich damit ähnlich einer Zylinder-Welle.

⁴³ So haben vollverglaste Fassaden bei Besonnung einen erhöhten solaren Wärmeeintrag und damit ein Risiko sommerlicher Überhitzung oder erhöhten Kühlbedarf zur Folge, ohne einen nennenswerten Zugewinn an Licht gegenüber einer Tageslicht-optimierten Fassade zu bringen (vgl. dazu [Hennings, 2006]). Verglaste Innenwände bewirken, daß sichtbar beleuchtete vertikale Flächen fehlen und Räume deshalb auch bei guter Beleuchtung optisch dunkel wirken.

Im Werkstatttraum Lindenberg nimmt der Schallpegel mit etwa 6 dB pro Entfernungs-Verdopplung ab, also nahezu wie im freien Schallfeld. Diese Eigenschaft ist relativ günstig für diesen Raum, in dem Kommunikation nur im Nahbereich stattfindet und in dem Lärm entsteht. Die Ähnlichkeit zum Freifeld besagt, daß für die Schallausbreitung im Raum das direkte Schallsignal dominant ist und reflektierte Anteile von untergeordneter Bedeutung sind. Unter diesen Bedingungen kann Störschall noch deutlich abgeschwächt werden, wenn zusätzlich die direkten Schallwege mit Hindernissen unterbrochen werden.

Im GMS-Unterrichtsraum fällt dagegen der Schallpegel nur um etwa 3 dB bei Verdopplung der Entfernung und damit ähnlich wie bei einer Zylinder-Welle. Auch diese Eigenschaft ist für die Raumnutzung optimal. Die gegenüber den Verhältnissen im Freifeld verringerte Abschwächung wird durch 'nützliche' Reflexionen, besonders an der schallharten Raumdecke bewirkt.

In sehr halligen Räumen kann sich außerhalb des 'Hallradius'⁴⁴ nahezu eine Unabhängigkeit des Schallpegels von der Entfernung ergeben, wenn die Energie des diffusen Nachhalls etwa gleichmäßig im Raum verteilt ist.

4.1.5 Räume mit Kommunikation im Nahbereich

In den beiden untersuchten Räumen in den Behinderten-Werkstätten Lindenberg ist Kommunikation nur im Nahbereich erforderlich. Die raumweite Schallübertragung ist hier unerwünscht, da es sich um betriebsbedingte Geräusche und um 'fremde' Gespräche handelt, die eher störend wirken. Die beiden Räume repräsentieren zwei unterschiedliche akustische Charakteristika: Der Werkstatttraum ist stark bedämpft, so daß die Sprachübertragung im Nahbereich sehr gut ist. Auch über raumweite Distanzen ist die Übertragungsqualität gut, jedoch bei hier wünschenswert hoher Abschwächung. Allerdings kann in Räumen mit solchen Eigenschaften 'fremde' Sprache aus der Distanz zwar nicht wegen ihrer Lautstärke, wohl aber wegen der Verständlichkeit stören.

Im weit weniger bedämpften Speisesaal ist die Sprachübertragung im Nahbereich ebenfalls sehr gut, da der Direktschall überwiegt. Sprache aus der Distanz ist dagegen wegen des großen Hallanteils schlecht verständlich, aber auch relativ wenig abgeschwächt, so daß sie aufgrund ihrer Lautstärke stören kann.

Optimal wäre für Räume mit Nahbereichs-Kommunikation eine Kombination beider Eigenschaften: die sehr gute Verständlichkeit in der Nähe bei starker Abschwächung und zugleich 'Verwischung' des Schalls aus der Distanz. Leider sind die beiden letztgenannten Eigenschaften gegenläufig in ihrer Abhängigkeit von der Bedämpfung des Raums, so daß ein Zielkonflikt entsteht. Dieser läßt sich nur umgehen, indem der Raum mit Hindernissen unterteilt wird, wie ansatzweise in den Simulationen zur Gruppenarbeit im GMS-Unterrichtsraum gezeigt. Um optimierte Lösungen dieser Art zu finden, sind weitere Untersuchungen erforderlich, die den Gegenstand dieser Arbeit überschreiten.

⁴⁴ Siehe Fußnote 42

4.2. Nutzen und Grenzen der Auralisation im Planungsprozeß

4.2.1 Vergleich der 'gemessenen' und der 'simulierten' Auralisation

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen in dieser Studie ist die Vergleichbarkeit gemessener und simulierter Resultate, mit dem Ziel, Aussagen über die mögliche Prognose-Qualität zu erhalten. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist, daß die in den Messungen verwendeten Wandler (Kunstkopf-Mikrofon und Lautsprecher) in den Simulations-Modellen nachgebildet sind.



Grafik 4.2.1 Die ersten 25 ms einer binauralen Impulsantwort im Unterrichtsraum der GMS oben aus Meßdaten, unten aus der Simulation abgeleitet.

In Grafik 4.2.1 sind jeweils die ersten 25 ms einer gemessenen und der korrespondierenden simulierten Raum-Impulsantwort dargestellt. In diesen Zeitabschnitt fallen der Direkt-schall und die ersten Reflexionen der Raum-Umschließungsflächen. Die Zeitpunkte der einzelnen Schall-Ereignisse stimmen gut überein, jedoch sind die Signalformen deutlich unterschiedlich. Letzteres kann sowohl in möglicherweise hörbaren Unterschieden der spektraler Amplituden-Zusammensetzung als auch in eventuell unhörbaren Phasendifferenzen begründet sein; wahrscheinlich ist eine Mischung beider Effekte. Weiterhin ist die Gewichtung der einzelnen Ereignisse in Simulation und Messung etwas unterschiedlich. Die visuelle Analyse der Impulsantworten, die den Hörproben zugrundeliegen, legt nahe, daß in den 'gemessenen' und den 'simulierten' Hörproben sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede wahrnehmbar sind.

Aus den Hörvergleichen zu den verschiedenen Objekten ergibt sich als gemeinsames Resultat, daß Unterschiede in der Übertragungsqualität, die über Nuancen hinausgehen und relevant für Planungsentscheidungen sein können, in den 'gemessenen' und den 'simulierten' Hörproben gleichermaßen gut wahrnehmbar sind. In sofern sind die auralisierten Hörproben also als Planungs-Hilfsmittel geeignet. Allerdings sind in verschiedenen der simulierten Hörproben Unterschiede in der Räumlichkeit, teilweise auch in der Klangfarbe zu den entsprechenden gemessenen Hörproben wahrnehmbar. 'Gemessene' und 'simulierte' Hörproben sind demzufolge in der Wahrnehmung zwar ähnlich aber meist nicht identisch.

4.2.2 Anwendung der Auralisation als Planungsinstrument

Ungeachtet der hörbaren Unterschiede von simulierten Hörproben zum jeweils gemessenen Pendant, das der Realität näher kommt, sind die Simulations-Hörproben als Planungs-Hilfsmittel geeignet. Dies gilt insbesondere, wenn es gilt 'akustischen Laien' in Planungsteams raumakustische Planungsvarianten zu erläutern und sie ohne 'unverständliche' Zahlen von den Wirkungen akustischer Maßnahmen zu überzeugen.

Wie schon in [Hennings, 2002] gezeigt, können 'akustische Laien' mittels Hörproben und bei geeigneter Fragestellung die raumakustische Qualität von Kommunikationsräumen recht gut beurteilen. Versuche in dieser Studie, mit 'akustischen Laien' über die Unterscheidung zwischen raumakustisch geeigneten und weniger geeigneten Lösungen hinauszugehen und Detail-Unterschiede wie beispielsweise zwischen 'simulierten' und 'gemessenen' Hörproben herauszuarbeiten, führten zu keinen verwertbaren Ergebnissen und wurden deshalb nicht weiter verfolgt. Offenbar bedarf es einer Einübung in das Heraushören von Details, um diese gut erkennen und beschreiben zu können. In normalen Planungs-Situationen kann ein solches Training nicht vorausgesetzt werden, so daß die sinnvolle Anwendung von Hörproben dort primär der Unterscheidung geeigneter von ungeeigneten Lösungen dient.⁴⁵

⁴⁵ Diese Aussagen beziehen sich auf normale Kommunikationsräume und ähnliche Nutzungsarten. Bei Räumen mit sehr hohem raumakustischem Anforderungsniveau wie Konzertsälen kann es angebracht sein, aus Hörproben 'mehr herauszuhören'. Das erfordert aber im genauen Hinhören geübte Probanden.

Nachteilig für kleine und mittlere Bauprojekte ist der für die Herstellung von Hörproben erforderliche Zeit- und Kosten-Aufwand. Um auch für solche Projekte die Vorteile der Auralisation nutzbar zu machen, können zwei Wege beschritten werden:

- a) Die Entwicklung vereinfachter Simulations- und Auralisations-Software, die beispielsweise für wenig komplexe Geometrien wie Quader eine schnelle Dateneingabe und einfach handhabbare Simulation und Auralisation erlaubt. Dies erfordert zunächst Entwicklungs-Aufwand bei den Herstellern der Simulations-Software.
- b) Das Erstellen eine Datenbank, in der Hörproben zu Räumen verschiedener Nutzungsart in typischer Größe und Ausstattung abgelegt sind. In raumakustisch unterschiedlich behandelten Varianten der Räume können dann die Auswirkungen der akustischen Maßnahmen hörbar gemacht werden. Das Herstellen der Hörproben erfordert einmalig den Simulations- und Auralisations-Aufwand. Auf die fertiggestellten Hörproben kann dann über das Internet oder über einen Datenträger zugegriffen werden. Die raumakustische Beratung erfolgt in diesem Fall nicht mit hohem Aufwand am Bauobjekt selber, sondern mit weit geringerem Aufwand am typischen Beispiel. (vgl. dazu auch Kap. 4.3)

4.3 Konzept für eine Hörproben-Datenbank

4.3.1 Zielsetzung für die Datenbank

Der Zeit- und damit auch Kosten-Aufwand für raumakustische Simulationen und die Herstellung von Hörproben ist für viele kleinere und mittlere Bauprojekte zu hoch. Andererseits sind viele der Kommunikationsräume (Besprechungs- und Konferenzräume, Unterrichtsräume, usw.) quaderförmig und einander ähnlich ausgestattet. Dieser Umstand ermöglicht, mit einer begrenzten Anzahl repräsentativer Typräume verschiedener Größe und Ausstattung, die jeweils mit verschiedenen akustischen Maßnahmen und unterschiedlicher Besetzung simuliert und auralisiert werden, eine Entscheidungshilfe aufzubauen. In einer Planung können dann ein oder zwei dem jeweils geplanten Raum ähnliche Musterräume aus der Datenbank ausgewählt werden. An den jeweils ähnlichsten Typräumen können dann die Wirkungen verschiedener raumakustischer Ausstattungen näherungsweise 'virtuell erprobt' werden, ohne den Aufwand für eine Simulation zu treiben.

4.3.2 Aufbau der Hörproben-Datenbank

In einer Hörproben-Datenbank können beispielsweise Typräume der Raumnutzungsarten

- Besprechungsraum, Konferenzraum,
- Unterrichtsraum, Seminarraum,
- Vortragsraum, Hörsaal,
- nach Bedarf weitere

vertreten sein, jeweils typisch möbliert und in zwei bis drei Größen-Abstufungen.

Zu jedem Typraum gehört eine Beschreibung mit Grafik der Geometrie und Möblierung. Für den akustisch unbehandelten Raum und mehrere sinnvolle Varianten der akustischen Behandlung werden die Planungswerte und das zugehörige Resultat gezeigt:

- Flächen- und Schallabsorptionsdaten der Oberflächen im Raum
- Anordnung der Schall-absorbierenden und -reflektierenden Flächen
- Nachhallzeiten im Sprache-relevanten Spektralbereich für den minimal, halbvoll und voll besetzten Raum
- Audio-Dateien mit binauralen Hörproben zu typischen Nutzungs-Situationen für den minimal, halbvoll und voll besetzten Raum

4.3.3 Öffentliche Bereitstellung und Nutzung der Datenbank

Für die allgemeine und freie Nutzung kann die Datenbank auf einem Internet-Server angeboten werden. Wenn dies in Form eines einfach aufgebauten, nach Raumnutzungsarten strukturierten 'Download'-Angebots geschieht, bedarf es nach dem Aufbau keiner kontinuierlichen Wartung, sondern lediglich der gelegentlichen Aktualisierung. Nutzer können die Hörproben nach dem Herunterladen über einen PC oder einen mp3-Player mit Kopf- oder Ohrhörer ohne zusätzliche technische Einrichtungen verwenden.

4.4 Personen im Raum

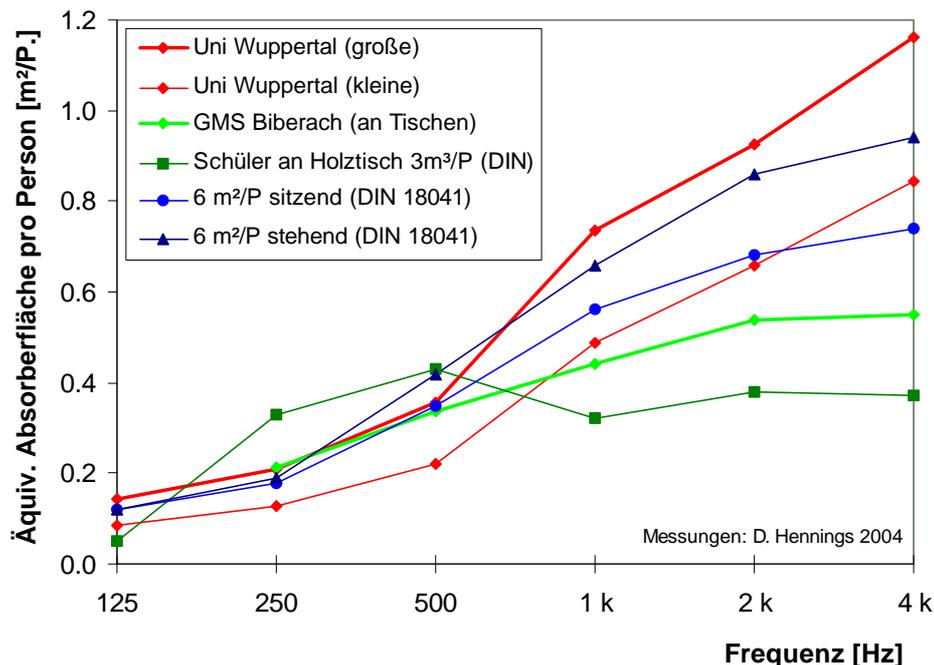
4.4.1 Raumakustische Einflüsse der Personen

Personen können einen erheblichen Einfluß auf die raumakustischen Eigenschaften haben, insbesondere indem sie die Räume vorwiegend bei mittleren und hohen Frequenzen zusätzlich bedämpfen. Bei einigen Messungen im Laufe dieses Projektes wurden darüber hinaus Hinweise dafür beobachtet, daß Personen die Ausprägung tieffrequenter Raum-Eigenschwingungen verändern.

In [DIN 18041] werden für Personen oktav-weise äquivalente Absorberflächen gegeben, deren Werte von der Personen-Dichte pro Fläche und der Position (sitzend, stehend ...) abhängen.

4.4.2 Messungen der Schallabsorption durch Personen

Im Rahmen der Lehrtätigkeit des Autors an der Universität Wuppertal sind einige Absorptions-Messungen mit Studenten im Hallraum entstanden. Die Studenten waren nach Körpergröße in zwei Gruppen aufgeteilt, die getrennt vermessen wurden, um eine Information über die Variationsbreite der Absorptions-Werte zu erhalten.



Grafik 4.4.1 Äquivalente Schallabsorptionsflächen von Personen; eigene Meßergebnisse und Werte aus [DIN 18041]

Die Ergebnisse (Grafik 4.4.1) zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Körpergröße. Die Gruppe der 'Größeren' ähnelt in den Werten bis 2 kHz den DIN-Werten für stehende Personen bei 6 m²/P.; allerdings standen die Probanden mit rund 2 m²/P. deutlich dichter. Die Bekleidung war überwiegend sommerliche Alltagskleidung.

Zusätzlich zeigt die Grafik Werte für an Tischen sitzende Personen (ca. 3 m²/P.), die aus den Messungen im Unterrichtsraum der GMS Biberach abgeleitet sind. Diese zeigen einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf als die DIN-Werte für Schüler an Holztischen.

Tabelle 4.4.1 Mittelwerte von Körpergröße und Körpergewicht (Masse) der vermessenen Personengruppen

Gruppe	mittl. Körpergröße	mittl. Körpergewicht
Uni Wuppertal (kleine)	1.68 m	59 kg
Uni Wuppertal (große)	1.84 m	83 kg
GMS Biberach	1.74 m	65 kg

4.4.3 Personen in der Simulation

Für die Simulation der Personen-Eigenschaften wurde ein gegenüber [Hennings, 2002] modifiziertes Personen-Modell verwendet.

Die Personen als Absorber und als Streukörper im Raum sind als Quader nachgebildet, deren Flächen mit hohen Streukoeffizienten belegt sind, so daß die Quaderform und die Orientierung nur einen geringen Einfluß haben. Im 'alten' Modell war die Schallabsorption an den (offenbar zu hohen) Werten aus [Fasold, Veres, 1998] orientiert. Das modifizierte Modell entspricht den 'sitzenden' Personen in [DIN 18041].

Die Personen als Sprecher werden nicht mehr mit der Charakteristik 'Sänger' entsprechend [Marshall, Meyer, 1985], sondern mit der Abstrahl-Charakteristik des in den Messungen verwendeten Lautsprechers modelliert, um zu den Messungen vergleichbare Simulations-Ergebnisse zu erhalten.

Als Hörer werden die Personen im neuen Modell mit der HRTF des in den Messungen eingesetzten Kunstkopf-Mikrofons modelliert [IRT, 2003] anstelle der zuvor verwendeten Daten aus [KEMAR, 1994].

5. Resumé

5.1 Lösungen für Kommunikationsräume

Die Ergebnisse der Messungen und Simulationen der untersuchten gebauten Beispiele zeigen, daß für Kommunikationsräume mit schallharter Decke gute bis sehr gute raumakustische Lösungen möglich sind, die eine Nutzung der Geschoßdecken für thermische Aktivierung oder als thermische Speichermasse nicht beeinträchtigen. Das Beispiel der GMS in Biberach zeigt eine solche Lösung. Simulationen zum aus raumakustischer Sicht noch nicht fertiggestellten Besprechungsraum des BOB-Gebäudes zeigen, daß auch für diesem Raum gute Lösungen realisierbar sind.

Der Hörsaal des ZUB-Gebäudes in Kassel offenbart eine Grenze der in dieser Untersuchung angewandten Lösungsstrategie, bevorzugt die Wände als akustische Absorberflächen auszubilden⁴⁶. Da hier die Wände größtenteils anderweitig genutzt werden, stehen nicht ausreichende Flächen für Absorber zur Verfügung. In solchen Fällen müssen die Möblierung und andere Objekte im Raum zur akustischen Bedämpfung eingesetzt werden. Diese Situation kann insbesondere auch in Gebäuden mit weitgehend verglasten Wandflächen entstehen, beispielsweise wenn neben der Fensterfassade auch die Innenwände verglast sind.

Anhand des Unterrichtsraums in der GMS Biberach wurde gezeigt, daß der für raumweite Kommunikation sehr gut geeignete Raum bei mehreren parallel im Raum arbeitenden Gruppen gegenseitige Störungen verursacht. Die gegensätzlichen Anforderungen der beiden Nutzungsarten lassen sich in einem Raum dieser Größe nicht so vereinbaren, daß eine für beide Nutzungsarten gute bis sehr gute Lösung entsteht. In größeren Räumen mit längerer Nachhallzeit, wie dem Speisesaal in Lindenberg, sinkt zwar die Verständlichkeit der Sprache von Nachbartischen, was die gegenseitige Störung reduziert. Jedoch steigt der Geräuschpegel durch den Nachhall an und solche Räume sind für raumweite Kommunikation wenig geeignet. Des weiteren wurde am Beispiel GMS nur ein geringer Einfluß der Anordnung des Absorberflächen auf die raumakustischen Eigenschaften gefunden. Als angemessene Methode, Kommunikationsräume an parallele Gruppenarbeit anzupassen, wurde die Unterteilung mittels (mobiler) Stellwände in der Simulation und Auralisation virtuell 'erprobt.

Einflüsse der Anordnung der Absorber auf die raumakustischen Qualitätsmaße in dem Ausmaß, wie sie in der Studie [Hennings, 2002] auftraten, konnten an den Varianten der hier untersuchten Räume nicht festgestellt werden. Das kann in der Geometrie der Räume begründet sein, denn der Raum mit besonders ausgeprägten Effekten war ein flacher Konferenzraum mit 140 m² Grundfläche und 3 m Höhe, wogegen die hier untersuchten Räume gleichmäßiger proportioniert sind. Dementsprechend sind die Effekte von untergeordneter Größe.

⁴⁶ Die vorangegangene Simulationsstudie [Hennings, 2002] hatte bereits gezeigt, daß in Kommunikationsräumen Schallabsorber an den Wänden die gegenüber schallabsorbierenden Decken überlegene Lösung ist.

5.2 Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Räume

Abgesehen von der genannten Einschränkung unzureichend verfügbarer Wandflächen lassen sich die Lösungen auf andere kleine bis mittelgroße Kommunikationsräume übertragen⁴⁷. Bei sehr großen Räumen müssen die raumakustischen Lösungen modifiziert werden, da Verstärkeranlagen für Sprache erforderlich werden und auch die thermischen Lösungen müssen berücksichtigen, daß wegen des steigenden Verhältnisses Volumen zu Innenoberflächen eine Klimatisierung über die Umschließungsflächen schwieriger wird.

In jedem Fall müssen die raumakustischen Eigenschaften eines Kommunikationsraums berechnet und die Absorber dimensioniert werden. Bei einfach geformten Räumen, wie etwa in gut proportionierten Quadern⁴⁸, reicht meist die oktavweise Berechnung der Nachhallzeiten mit der Sabineschen Näherungsformel aus. Zusätzlich müssen weitere Kriterien, wie durch Raumabmessungen bedingte Eigenfrequenzen und Fokussierungen bei konkaven Umschließungsflächen, beachtet werden (siehe auch Anhang A 4).

5.3 Eignung und Grenzen der Berechnungsverfahren und Datenquellen

Während die Sabinesche und andere Näherungsformeln auf einfache Geometrien eingeschränkt sind, können in einer Simulation auch komplexe Raumgeometrien berechnet werden. Mit der Komplexität steigt lediglich der Eingabe-Aufwand und die Anzahl der notwendigen 'Schallstrahlen' und damit die Rechenzeit für die Simulation. Darüber hinaus lassen sich mit einer Simulation Orts-abhängige Effekte, beispielsweise die Gleichmäßigkeit der Übertragungsqualität im Raum bestimmen. Zudem lassen sich Simulationsergebnisse für die Auralisation verwenden.

Eine wichtige Grenze der auf 'Schallstrahlen' und 'Spiegelquellen' beruhenden Simulationsverfahren liegt darin, daß die Welleneigenschaft des Schalls vernachlässigt wird und lediglich einige Auswirkungen wie die Beugung an Kanten parametrisiert werden. Andere Wellen-Effekte wie Eigenfrequenzen des Raums oder die Orts-abhängig unterschiedliche Wirksamkeit von Tiefen-Absorbern werden nicht nachgebildet. Da die nicht modellierten Effekte besonders zum Tragen kommen, wenn die Wellenlängen in der Größenordnung der Raumabmessung liegen, sind die Simulationsergebnisse bei tiefen Frequenzen mit Vorbehalt zu betrachten. Dieser 'Vorsichts-Bereich' läßt sich mit einer oberen Grenzfrequenz abschätzen⁴⁹. Darüber hinaus können bei rechteckigen Räumen⁵⁰ mit einer einfachen Berechnung der Eigenfrequenzspektren für die drei Raumachsen Risiken für besonders ausgeprägte Raumresonanzen erkannt werden.

⁴⁷ Als Orientierung kann der Anwendungsbereich des DIN 18041 für Kommunikationsräume zu dienen. Wie bei einer sinnvollen Anwendung der DIN gibt es keine scharfe Grenze.

⁴⁸ Als Anhaltspunkt für gute Proportionen aus raumakustischer Sicht kann gelten: Quotient aus größter und kleinster Raumabmessung < 3, besser < 2.5.

⁴⁹ vgl. dazu auch [Vorländer, 2002]

⁵⁰ In der akustischen Literatur wird für solche Räume oft der Begriff 'shoebox room' verwendet.

In vielen Fällen sind für die Innenoberflächen in Räumen keine hinreichend genau bekannten Absorptionsdaten verfügbar. Obwohl die α -Datenbank der PTB⁵¹ bei der Auswahl geeigneter Daten eine große Hilfe sein kann, ist auch hier nicht immer eine passende Konstruktion zu finden. Bei größeren Bauprojekten mit vielen Kommunikationsräumen, wie beispielsweise Schulen, kann es daher sinnvoll sein, entweder die Eigenschaften der einzelnen Konstruktionen im Hallraum zu messen oder vor dem allgemeinen Innenausbau einen Musterraum aufzubauen und diesen raumakustisch zu vermessen.

Die Nachhallzeiten liefern zwar eine recht gute Bewertung der raumakustischen Qualität eines Raums als Ganzes, jedoch können andere Qualitätsmaße wie die Schwerpunkzeiten eine differenziertere Information, beispielsweise über die Ortsabhängigkeit der Übertragungsqualität im Raum liefern. Deshalb ist es bei gehobenem Anspruch an die raumakustische Qualität sinnvoll, neben der Nachhallzeit zusätzliche Maße zu verwenden, die die Übertragungsqualität bewerten.

5.4 Auralisation als Planungshilfsmittel

Bereits zuvor wurde die Eignung auralisierter Hörproben als Entscheidungs-Hilfsmittel für die raumakustische Planung von Kommunikationsräumen gezeigt⁵². Anhand der untersuchten Räume konnte nun auch festgestellt werden, daß aus Simulationen gewonnene Hörproben mit in der gebauten Realität 'gemessenen' Hörproben genügend gut übereinstimmen, um als Entscheidungs-Kriterium dienen zu können. In den meisten Vergleichen waren jedoch auch Unterschiede zwischen 'simuliert' und 'gemessen' wahrnehmbar, so daß eine simulierte Hörprobe nicht unbedingt als exakte Prognose für den Höreindruck in einem Raum gelten kann.

Die Unsicherheiten in Absorberdaten wirken sich in der Auralisation ebenso aus wie in allen Berechnungen und können nur mit einer Verbesserung der Datenbasis oder mit individuellen Messungen an Proben überwinden.

Ein Nachteil der Auralisation als Planungshilfsmittel ist der relativ hohe Aufwand, der mit der Herstellung von Hörproben verbunden ist. Bis eventuell in Zukunft einfacher und mit weniger Aufwand handhabbare Auralisations-Werkzeuge verfügbar sind, läßt sich mit einer Datenbank, die Hörproben für typischen Raumarten in verschiedenen raumakustisch gestalteten Varianten enthält, eine einfach nutzbare und kostengünstige Entscheidungshilfe für kleine und mittlere Bauprojekte etablieren.

⁵¹ [PTB, 200x]

⁵² [Hennings, 2002]

5.5 Weitere Entwicklung

Während für Kommunikationsräume mit schallharter Decke klare und in den meisten Fällen erfüllbare Anforderungen gestellt werden können, sind bei Räumen mit paralleler Nahbereichs-Kommunikation an mehreren Orten bestenfalls Kompromisse aus widersprüchlichen Anforderungen möglich⁵³. Hier sind weitere Untersuchungen sinnvoll, wie im Konflikt zwischen einem zusammenhängenden Raum und der Notwendigkeit der akustischen 'Parzellierung' gute Lösungen gefunden werden können.

Wie schon weiter oben erwähnt, kann eine einmalig hergestellte und öffentlich verfügbare Hörproben-Datenbank die Vorteile der Auralisation, daß auch Planer und Bau-Beteiligte ohne akustische Fachkenntnisse eine Grundlage für Entscheidungen haben, für kleine und mittlere Bauprojekte verfügbar machen.

Zur Verbesserung der Datengrundlage für alle Berechnungen, sowie für Simulation und Auralisation ist eine Angabe gemessener Schallabsorptionsgrade im Sprach-relevanten Spektralbereich für alle Baukonstruktionen, die Oberfläche in Innenräumen sein können, notwendig. Für Simulation und Auralisation sind Streukoeffizienten der Oberflächen-Konstruktionen eine sinnvolle Ergänzung.

Einfacher handhabbare Simulations- und Auralisations-Werkzeuge, die eventuell in eine umfassende Planungs-Software integriert sind, können helfen, die raumakustische Optimierung zum normalen Bestandteil der Planung zu machen. Da solche Werkzeuge auch von akustischen Laien genutzt werden können, müssen sie allerdings ihre Anwendungsgrenzen erkennen, gegebenenfalls vor Planungsfehlern warnen und akustischen Sachverstand anfordern.

5.6 Dank

Die vorliegenden Untersuchungen konnten aufgrund einer Förderung im Rahmen des Programms 'EnOB' des Bundeswirtschaftsministeriums durchgeführt werden.

Gedankt sei an dieser Stelle all Denjenigen in den Planungs- und Monitoring-Teams sowie bei den Betreibern der untersuchten Objekte, die mir 'Türen geöffnet' haben und die mir mit vielfältiger Unterstützung beim Vorbereiten und Durchführen der Messungen vor Ort die Arbeit erleichtern haben. Den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich und den Koordinatoren des Monitoring-Programms sei Dank dafür, daß sie das Projekt ermöglicht und wohlwollend begleitet haben.

Nicht zu vergessen alle Kollegen, die mir in Diskussionen und Gesprächen geholfen haben, Ideen weiter zu entwickeln, und die Probanden, die Hörproben angehört und beurteilt haben und damit zum Gelingen beigetragen haben.

⁵³ Ein extremes Beispiel ist ein 'Call Center'.

Anhang

A 1 Hinweise zur Verwendung der Hörproben

Alle Hörproben sind binaural und für die Wiedergabe über Kopfhörer bestimmt. Nur bei Kopfhörer-Wiedergabe wird der Raumeindruck in den Hörproben wahrnehmbar. Da die Hörproben mit 'Diffusfeld-Entzerrung' hergestellt sind, eignen sich Kopfhörer mit linearem Diffusfeld-Frequenzgang besonders für eine weitgehend unverfälschte Wiedergabe.⁵⁴

Bei der – wenig empfehlenswerten – Wiedergabe über Lautsprecher muß beachtet werden, daß die Akustik des simulierten Raums mit der Akustik des Wiedergaberaums überlagert wird, so daß die Unterschiede der Raumakustik nur in sehr stark bedämpften Wiedergaberäumen erkennbar bleiben. Die Binauralität kann nur mit einer Einrichtung zur Übersprech-Kompensation ('cross talk cancelling') für einen sehr kleinen Bereich des Wiedergaberaums annähernd erhalten bleiben. Zudem muß die Entzerrung für den Wiedergaberaum und die verwendeten Lautsprecher korrigiert werden.

Alle Hörproben sind auf gleiche Sprecher-Lautstärke normiert. Beim Vergleich von Hörproben soll daher die Lautstärke-Einstellung unverändert bleiben. Die zwischen den Hörproben hörbaren Lautstärke-Unterschiede entsprechen den akustischen Eigenschaften der Räume.

Da ohne besondere technische Hilfsmittel keine absolute Kalibrierung der Wiedergabelautstärke erfolgen kann, ist es empfehlenswert, vor einer Vergleichsrunde aufgrund des subjektiven Eindrucks den Lautstärkesteller des Wiedergebe-Gerätes so einzustellen, daß die lautesten Hörproben nicht zu laut und die leisesten Hörproben nicht zu leise erscheinen.

Eine Beeinflussung der gehörten Raumakustik durch Seheindrücke kann vermieden werden, indem beim Anhören die Augen geschlossen gehalten werden, oder indem der Wiedergaberaum abgedunkelt wird.

Kopfbewegungen während des Anhörens können irritierend wirken, da die simulierten Räume relativ zum Kopf fixiert sind, und sich anders als natürliche Räume bei Kopfdrehungen mitdrehen.

⁵⁴ Die Methode zur Ermittlung der Diffusfeld-Entzerrung von Kopfhörern ist in [ITU, 1990] genormt. Diffusfeld-optimierte Kopfhörertypen sind u.a.: AKG K 240 *DF* (nur mit Zusatz 'DF!'), Beyer DT-770 pro, Beyer DT-990 pro, STAX Lamda Pro.

A 2 Hörproben-Übersicht

Nr. ⁵⁵	Raum	Variante ⁵⁶	mess / sim
1	VIKA-Besprechungsraum	0 P. Vortrag, Hörer 1	mess
2	VIKA-Besprechungsraum	1 P. Vortrag, Hörer 1	mess
3	VIKA-Besprechungsraum	3 P. Vortrag, Hörer 1	mess
4	VIKA-Besprechungsraum	9 P. Vortrag, Hörer 1	mess
5	VIKA-Besprechungsraum	wie2, Specher 90° gedreht	mess
6	VIKA-Besprechungsraum	1 P. Vortrag, Hörer 2	mess
7	VIKA-Besprechungsraum	1 P. Besprechung, Hörer 1	mess
8	VIKA-Besprechungsraum	1 P. Besprechung, Hörer 2	mess
9	VIKA-Besprechungsraum	0 P. Vortrag, Hörer 1	sim
10	VIKA-Besprechungsraum	0 P. Vortrag, Hörer 2	sim
11	VIKA-Besprechungsraum	0 P. Besprechung, Hörer 1	sim
12	VIKA-Besprechungsraum	0 P. Besprechung, Hörer 2	sim
13	VIKA-Besprechungsraum	9 P. Vortrag, Hörer 1	sim
14	VIKA-Besprechungsraum	9 P. Vortrag, Hörer 2	sim
15	VIKA-Besprechungsraum	9 P. Besprechung, Hörer 1	sim
16	VIKA-Besprechungsraum	9 P. Besprechung, Hörer 2	sim
17	VIKA-Besprechungsraum	30 P. Vortrag, Hörer 1	sim
18	VIKA-Besprechungsraum	30 P. Vortrag, Hörer 2	sim
19	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., Vortrag, H.1	sim
20	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., Vortrag, H.2	sim
21	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., Besprech., H.1	sim
22	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., Besprech., H.2	sim

Fortsetzung nächste Seite

⁵⁵ Die Nr. entspricht der Track-Nr. auf der Hörproben-CD zum Projekt.

⁵⁶ Tatsächlich benötigt ein Vortrag oder eine Besprechung mindestens 2 Personen im Raum, jedoch werden die Eigenschaften vieler Räumen von ein oder zwei Personen nur minimal beeinflusst, so daß Raum-Varianten mit 0 bis 2 Personen sich kaum unterscheiden.

Hörproben-Übersicht, Fortsetzung

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
23	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., 30 P. Vortrag, H.1	sim
24	VIKA-Besprechungsraum	VPR + mikroperf. Abs., 30 P. Vortrag, H.2	sim
25	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., Vortrag, H.1	sim
26	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., Vortrag, H.2	sim
27	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., Besprech., H.1	sim
28	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., Besprech., H.2	sim
29	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., 30 P. Vortrag, H.1	sim
30	VIKA-Besprechungsraum	mit Plattenabsorb., 30 P. Vortrag, H.2	sim
31	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag am Pult, H. 1	mess
32	ZUB-Hörsaal	wie vor, Speicher 90° gedreht	mess
33	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag neben Pult, H. 1	mess
34	ZUB-Hörsaal	18 P. Vortrag neben Pult, H. 1	mess
35	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer hinter Säule	mess
36	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer 1	sim
37	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer hinter Säule	sim
38	ZUB-Hörsaal	1 P. Vortrag, Hörer 3	sim
39	ZUB-Hörsaal	18 P. Vortrag, Hörer 1	sim
40	ZUB-Hörsaal	18 P. Vortrag, Hörer 3	sim
41	ZUB-Hörsaal	Stellwände 1 P. Vortrag, H.1	sim
42	ZUB-Hörsaal	Stellwände 1 P. Vortrag, H.3	sim
43	ZUB-Hörsaal	Stellwände 18 P. Vortrag, H.1	sim
44	ZUB-Hörsaal	Stellwände 18 P. Vortrag, H.3	sim
45	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 1 P. Vortrag, H.1	sim
46	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 1 P. Vortrag, H.3	sim
47	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 18 P. Vortrag, H.1	sim
48	ZUB-Hörsaal	Abs. Lüft.-Rohr + Stellw. 18 P. Vortrag, H.3	sim

Fortsetzung nächste Seite

Hörproben-Übersicht, Fortsetzung

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
49	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 1	mess
50	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 2	mess
51	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1	mess
52	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2	mess
53	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 1	sim
54	GMS-Unterrichtsraum	1 P. Vortrag, Hörer 2	sim
55	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1	sim
56	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2	sim
57	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 1, ein Ohr -40 dB	sim
58	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Vortrag, Hörer 2, ein Ohr -40 dB	sim
59	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, gegenüber	sim
60	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, Nachbartisch 1	sim
61	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, Nachbartisch 2	sim
62	GMS-Unterrichtsraum	17 P. Gruppen, Nachbartisch 3	sim
63	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, gegenüber	sim
64	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, Nachbartisch 1	sim
65	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, Nachbartisch 2	sim
66	GMS-Unterrichtsraum	Stellwände, 17 P. Gruppen, Nachbartisch 3	sim
67	GMS-Unterrichtsraum	abs. Decken, 17 P. Grp, gegenüber	sim
68	GMS-Unterrichtsraum	abs. Decken, 17 P. Grp, Nachbartisch 1	sim
69	GMS-Unterrichtsraum	abs. Decken, 17 P. Grp, Nachbartisch 2	sim
70	GMS-Unterrichtsraum	abs. Decken, 17 P. Grp, Nachbartisch 3	sim
71	GMS-Unterrichtsraum	Stellw., abs. Decken, 17 P. Grp, gegenüber	sim
72	GMS-Unterrichtsraum	Stellw., abs. Decken, 17 P. Grp, Nachb. 1	sim
73	GMS-Unterrichtsraum	Stellw., abs. Decken, 17 P. Grp, Nachb. 2	sim
74	GMS-Unterrichtsraum	Stellw., abs. Decken, 17 P. Grp, Nachb. 3	sim

Fortsetzung nächste Seite

Hörproben-Übersicht, Fortsetzung

Nr.	Raum	Variante	mess / sim
75	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	mess
76	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung	mess
77	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher seitlich in 3.5 m Entfernung	mess
78	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	sim
79	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung	sim
80	Kabelmontage Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 58 P.	sim
81	Kabelmontage Lindenberg	Sprecher in 10 m Entfernung, 58 P.	sim
82	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	mess
83	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, abgew.	mess
84	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 15 P.	mess
85	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich	sim
86	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, abgew.	sim
87	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 1	sim
88	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 2	sim
89	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 15 P.	sim
90	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, 15 P. , abg.	sim
91	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 1, 15 P.	sim
92	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 2, 15 P.	sim
93	Speisesaal Lindenberg	Gespräch, Nahbereich, 100 P.	sim
94	Speisesaal Lindenberg	Sprecher in 3.6 m Entfernung, 100 P. , abg	sim
95	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 1, 100 P.	sim
96	Speisesaal Lindenberg	Hörer auf der Empore, Sprecher 2, 100 P.	sim

A 3 Literatur und Quellen

- [Archimedes, 1992] Music for Archimedes, Audio-CD, monophonic recording (anechoic and semi-reverberant music and speech samples); CD B&O 101, Struer (DK): Bang & Olufsen, 1992.
- [Aurora] A. Farina: Aurora; Software zur Messung und Verarbeitung von Impulsantworten; im Internet unter 'www.angelofarina.it'.
- [BOB, 2004] bob - Balanced Office Building; Solarbau:MONITOR Portrait Nr. 19; im Internet unter 'www.solarbau.de'.
- [CATT, 2002] B.-I. Dalenbäck: CATT-Acoustic v8 User's Manual. Göteborg, 2002.
- [DIN 18041] DIN 18041 (2004-05): Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen; alte Fassung: DIN 18041 (1968-10).
- [Fasold, Veres, 1998] W. Fasold, E. Veres: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen; 2. Aufl. 2003.
- [Fuchs, Zha, 1996] H.V. Fuchs, X. Zha: Wirkungsweise und Auslegungshinweise für Verbund-Platten-Resonatoren. Zeitschr. f. Lärmbek. 43 (1996), S. 1-8.
- [Fuchs, Zha, Schneider, 1997] H.V. Fuchs, X. Zha, W. Schneider: Zur Akustik in Büro- und Konferenzräumen. Bauphysik 19 (1997), Heft 4, S. 105-112.
- [GMS, 2004] Gebhard-Müller-Schule, Kreis-Berufsschulzentrum Biberach; Solarbau:MONITOR Portrait Nr. 20; im Internet unter 'www.solarbau.de'.
- [Hennings, 1998] D. Hennings: Wie können Büro- und Verwaltungsbauten ohne großen Aufwand thermisch optimiert werden? Deutsche Bauzeitung 132 (1998), Nr.3, S.109-116. Ergänzte Fassung im Internet unter 'www.iwu.de'.
- [Hennings, Knissel, 2000] D. Hennings, J. Knissel: Energieeffiziente Bürogebäude. BINE-Profi-Info II / 2000. Bonn : BINE-Informationdienst. Im Internet unter 'www.bine.info'.
- [Hennings, 2002] D. Hennings: Optimierung der Raumakustik in passiv klimatisierten Räumen mit schallharter Decke. Eine Studie zur Akustik in Kommunikationsräumen; Köln, 2002; im Internet unter 'www.eclim.de'.
- [Hennings, 2003] D. Hennings: Raumakustik und passive Klimatisierung; Das Bauzentrum, Jg.51, Heft 12, Dez. 2003.
- [Hennings, 2004] D. Hennings: Communication Room Acoustics in Passive Cooled Buildings; CFA / DAGA 2004, Strasbourg, March 2004.
- [Hennings, 2005] D. Hennings: Raumakustik in passiv klimatisierten Gebäuden; 9. Int. Passivhaustagung, Rhein-Neckar-Dreieck, April 2005.

- [Hennings, 2006] D. Hennings: Thermisch optimierte Büro- und Verwaltungsgebäude. Tagungsbroschüre zum Kalksandstein Bauseminar 2006; herunterladbar nach Anwender-Login bei 'www.kalksandstein.de'.
- [IRT, 2003] Institut für Rundfunktechnik (IRT), München: Messung der HRTF des Neumann KU-100; private Mitteilung.
- [ISO 3382] ISO 3382 (1997): Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters; deutsche Version: DIN EN ISO 3382 (2000)
- [ITU, 1990] International Telecommunication Union: Recommendation BS.708 - Determination of the electro-acoustical properties of studio monitor headphones.
- [KEMAR, 1994] B. Gardner, K. Martin: HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. Im Internet: 'sound.media.mit.edu/kemar.html' 1994/2000
- [Lebenshilfe, 2005] Neue Werkstätten für behinderte Menschen - Lebenshilfe Lindenberg; Solarbau:MONITOR Portrait Nr. 21; im Internet unter 'www.solarbau.de'
- [Marshall, Meyer, 1985] A. H. Marshall and J. Meyer: Directivity and Auditory impression of Singers. *Acustica*, 58 (1985) p.130; auch unter 'www.ptb.de'.
- [PTB, 200x] Physikalisch-technische Bundesanstalt: Datenbank der Absorptionsgrade und Diffusivitäten. Im Internet unter 'www.ptb.de'.
- [Vorländer, 2002] M. Vorländer: Geometrische Akustik in kleinen Räumen ? Fortschritte der Akustik - DAGA '02, Bochum 2002, S. 596-597
- [ZUB, 200x] ZUB - Zentrum für Umweltbewusstes Bauen; Solarbau:MONITOR Portrait Nr. 12; im Internet unter 'www.solarbau.de'.

A 4 Regeln für die raumakustische Planung - Checkliste

Die raumakustische Optimierung in passiv klimatisierten und Bauteil-aktivierten Gebäuden stellt einen Sonderfall dar, in dem neben allgemeinen raumakustischen Regeln, wie sie beispielsweise in [DIN 18041] beschrieben sind, zusätzliche Anforderungen aufgrund thermischer Funktionen von Gebäudeteilen berücksichtigt werden müssen. In den folgenden Punkten sind wichtige Aspekte der raumakustischen Optimierung in passiv klimatisierten und Bauteil-aktivierten Gebäuden zusammengefaßt.

1. Die *Nutzungsart* bestimmt unter anderem die raumakustischen Anforderungen. Deshalb ist die Beschreibung der Nutzungs-bedingten Anforderungen eine wichtige Voraussetzung für eine gute raumakustische Planung. Wichtiger Bestandteil der Nutzung ist die Besetzung des Raums, die in vielen Fällen variabel ist.
2. Die *Raumgröße* soll sowohl der Anzahl der Personen im Raum als auch der Art der Schallquelle angemessen sein. Sie kann an einer Personen-bezogenen Volumen-kennzahl orientiert sein, die oft bei einigen m³ pro Person liegt. Je größer das Volumen eines Raums ist, umso mehr Schall-Leistung ist erforderlich, um eine gewünschte Lautstärke zu erzeugen. Die Nachhallzeit steigt im Allgemeinen (bei etwa gleichbleibender Bedämpfung) mit dem Volumen an.
3. *Raum-Proportionen*: Wenn raumweit Kommunikation, Sprach- oder Musikdarbietungen stattfinden sollen (Raum-Gruppe A in DIN 18041), können sich extreme Seitenverhältnisse (z.B. deutlich über 1:2) ungünstig auswirken. Falls ungünstige Seitenverhältnisse unvermeidlich sind, ist eine detaillierte Planung mit Simulation empfehlenswert.
4. *Seitenverhältnisse, Resonanzen*: Bei kleinen und mittelgroßen Räumen kleine ganzzahlige Seitenverhältnisse (z.B. 1:2, 3:4) vermeiden, damit keine ausgeprägten Raumresonanzen entstehen (Resonanz-Spektren prüfen, vgl. Grafik 3.3.7). Falls störende Resonanzen auftreten, etwa weil ungünstige Seitenverhältnisse unvermeidbar sind, angepaßte Tiefenabsorber bevorzugt in Ecken und Kanten des Raums anbringen.
5. Bei *konkav gekrümmten Flächen* wie Kuppeln, Zylindern (auch Ausschnitten davon) prüfen ob Fokussierungen und/oder Echos entstehen können; ggf. Gegenmaßnahmen wie Absorber, Reflektoren oder Diffusoren vorsehen.
6. Die angemessene *Nachhallzeit* ist ein Kompromiß aus gegenläufigen Wirkungen des Nachhalls. Eine geringere Nachhallzeit verbessert die Deutlichkeit und Sprachverständlichkeit und dämpft den Lärm im Raum, senkt zugleich aber auch den Nutzschallpegel an von der Schallquelle entfernteren Punkten und reduziert die Rückmeldung des Raums an Sprecher oder Musiker. Eine erhöhte Nachhallzeit hat die entgegengesetzten Wirkungen. Zudem gibt es kulturell geprägte Erwartungen an den Nachhall von Räumen. Die empfohlenen Nachhallzeiten in DIN 18041 stellen für verschiedene Nutzungsarten und Raumgrößen gefundene Kompromisse dar. Bei Räumen mit einfacher Geometrie reicht oft die Berechnung der Oktav-Nachhallzeit mit Näherungsformeln (Sabine, Eyring) aus.

7. Die *Personen im Raum* können großen Einfluß auf den Nachhall haben. Deshalb ist es sinnvoll die Raumeigenschaften nicht nur bei voller Besetzung zu betrachten, sondern den gesamten in der Nutzung vorkommenden Bereich von minimaler bis maximaler Besetzung zu berücksichtigen und dazu beispielsweise den Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeiten in DIN 18041 zu nutzen.
8. Die *Anordnung absorbierender, reflektierender und streuender Flächen* ist ein Mittel um einen Raum für eine Nutzungsart zu optimieren. Bei dieser Anordnung gilt es, die Erfordernisse der passiven Klimatisierung oder Bauteilaktivierung zu berücksichtigen. Ein thermisch wirksames Bauteil kann akustisch als Reflektor oder als Streukörper wirken, nicht jedoch als Schallabsorber, da letztere nahezu immer auch als Wärmedämmung wirken und damit das Bauteil thermisch unwirksam machen⁵⁷. Reflektoren an geeigneter Stelle, beispielsweise eine reflektierende Raumdecke, können die Gleichmäßigkeit der Beschallung bei raumweiter Kommunikation oder Darbietung verbessern. Reflektoren können auch eingesetzt werden, um Rückmeldungen für Sprecher oder Musiker zu erzeugen oder um das gegenseitige Hören mehrerer Akteure zu verbessern. Absorber können neben der allgemein bedämpfenden Wirkung bei richtiger Anordnung Echos oder Fokussierungen verhindern, indem sie Reflexionen an kritischen Flächen unterdrücken. Tiefen-Absorber in Raum-Ecken oder -Kanten bedämpfen Raum-Resonanzen besonders gut. Geeignet angeordnete Streukörper und Diffusoren können die Gleichmäßigkeit der Beschallung im Raum verbessern. Zudem können die eingesetzt werden um Flatterechos oder Fokussierungen zu verringern oder ganz zu beseitigen.
9. Fast immer ist es günstig *Störschall und Lärm* so nah wie möglich an den Quellen, vorzugsweise direkt an den Quellen zu reduzieren. Die Ausbreitung von Störschall kann durch Unterbrechen des direkten Schallweges mit Hindernissen und von Reflexionen mit absorbierenden Oberflächen verringert werden. In halligen Räumen kann eine stärkere Bedämpfung zu einer Senkung des gesamten Lärmpegels führen. Bei menschlicher Kommunikation kann diese Wirkung verstärkt werden durch die Neigung, bei weniger Lärm auch leiser zu sprechen. Dieser Effekt kann besonders in Unterrichtsräumen eine Rolle spielen.
10. In Räumen, deren raumakustische Eigenschaften für die Nutzungs-Qualität von besonderer Bedeutung sind, wie Konferenz- und Vortragsräume, Unterrichtsräume Aufführungsräume für Sprache oder Musik kann es sinnvoll sein, die raumakustische Planung mittels *Simulation* und *Auralisation* zu unterstützen.

⁵⁷ Eine denkbare Ausnahme sind in Beton eingegossene Helmholtz-Resonatoren, die nur kleine Öffnungsflächen beanspruchen.

A 5 Daten der untersuchten Räume

A 5.1 Großer Besprechungsraum im BOB-Gebäude, Aachen

Raum							
Länge	7.50 m	Grundfläche			50 m ²		
Breite	6.70 m	Netto-Volumen			136 m ³		
Höhe	2.70 m						
Oberflächen		Schallabsorptionsgrade					
Bauteil		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Boden (Nadelfilz)		0.02	0.05	0.13	0.20	0.30	0.40
Decke		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Fensterwand (Beton)		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Wände (Leichtbau)		0.08	0.08	0.06	0.04	0.04	0.05
Säulen (Beton)		0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Türen		0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
Innen-Fenster		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Außen-Fenster		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Decken-Folie (teil-transparent)		0.02	0.06	0.07	0.07	0.10	0.15
Tisch		0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
VPR		0.74	0.54	0.28	0.17	0.12	0.00
Mikroperf. Abs.		0.25	0.50	0.85	0.45	0.25	0.18
Plattenabsorber	Typ 1	0.50	0.35	0.18	0.09	0.04	0.02
Plattenabsorber	Typ 2	0.35	0.45	0.23	0.11	0.06	0.03

A 5.2 ZUB-Hörsaal, Kassel

Raum							
Länge	12.00 m	Grundfläche	97 m ²				
Breite	8.12 m	Netto-Volumen	354 m ³				
Höhe	3.63 m						
Oberflächen		Schallabsorptionsgrade					
Bauteil		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Boden (Magnesitestrich)		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Decke		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Wände (Beton)		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Wände (Lehmziegel)		0.08	0.09	0.12	0.13	0.19	0.25
Wände (Lehmziegel m. Fugen)		0.25	0.20	0.12	0.13	0.19	0.23
Wände (Plattenabsorber)		0.32	0.16	0.09	0.05	0.04	0.03
mobile Trennwand, Türen		0.10	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05
Fenster		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Lüftungsrohr		0.10	0.15	0.15	0.10	0.05	0.10
Lüftungs-Öffnungen		0.15	0.20	0.45	0.35	0.30	0.25
Mobiliar (Holzwerkstoffe)		0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
Stühle (Sitzflächen)		0.15	0.25	0.30	0.35	0.50	0.60
Stühle (Holzteile)		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08
Lüftungsrohr (beschichtet)		0.08	0.29	0.75	0.98	0.93	0.96
Stellwände (Vorderseite)		0.40	0.60	0.30	0.15	0.05	0.03
Stellwände (Rückseite)		0.20	0.40	0.90	0.95	0.85	0.60

A 5.3 Unterrichtsraum in der Gebhard-Müller-Schule, Biberach

Raum							
Länge	7.86 m	Grundfläche	61 m ²				
Breite	7.70 m	Netto-Volumen	180 m ³				
Höhe	3.10 m						
Oberflächen		Schallabsorptionsgrade					
Bauteil		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Boden (Nadelfilz)		0.02	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
Decke		0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Wände (Leichtbau)		0.25	0.20	0.13	0.10	0.08	0.08
Absorber (Brüstung)		0.90	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10
Deckenkoffer (gelocht)		0.30	0.65	0.90	0.75	0.45	0.20
Deckenkoffer (ungelocht)		0.14	0.09	0.05	0.03	0.05	0.00
Tür		0.10	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05
Innen-Fenster		0.12	0.10	0.05	0.04	0.02	0.02
Außen-Fenster		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Säule (Beton)		0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Tische		0.02	0.02	0.03	0.03	0.07	0.10
Decke (absorbierend)		0.21	0.30	0.36	0.28	0.17	0.08

A 5.4 Kabelmontage-Werkstatt, Lindenberg

Raum							
Länge	19.20 m	Grundfläche	258 m ²				
Breite	14.90 m	Netto-Volumen	930 m ³				
Höhe	3.60 m						
Oberflächen		Schallabsorptionsgrade					
Bauteil		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Boden (Estrich)		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Decke		0.28	0.36	0.40	0.45	0.50	0.55
Innen-Wände		0.25	0.20	0.13	0.10	0.08	0.08
Innen-Wände (verglasst)		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Außen-Wände (verglasst)		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Decke (OSB)		0.23	0.20	0.17	0.04	0.03	0.02
Säulen (Holz)		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08
Träger (Holz)		0.12	0.10	0.05	0.04	0.02	0.02
Lüftungsrohr		0.10	0.15	0.15	0.10	0.05	0.10
Regale (hor. Flächen)		0.30	0.40	0.40	0.35	0.35	0.30
Regale (vertikal, Teil-transp.)		0.30	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40
Tische (hor. Flächen)		0.30	0.40	0.40	0.35	0.35	0.30
Tische (vertikal, Teil-transp.)		0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

A 5.5 Speisesaal, Lindenberg

Raum							
Länge	14.40 m	Grundfläche	174 m ²				
Breite	8.50 m	Netto-Volumen	1201 m ³				
Höhe	6.90 m						
Oberflächen		Schallabsorptionsgrade					
Bauteil		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Boden (Estrich)		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Decke		0.28	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30
Wände (Beton)		0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Wände (Leichtbau)		0.25	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10
Glasflächen (innen)		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Außen-Wände (verglast)		0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Säulen (Holz)		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08
Träger (Holz)		0.12	0.10	0.05	0.04	0.02	0.02
Lüftungsrohr		0.10	0.15	0.15	0.10	0.05	0.10
Treppe		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08
Galerie unten		0.28	0.36	0.40	0.45	0.50	0.55
Tische		0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10