

Dr. rer. nat. Detlef Hennings
Dipl.-Physiker

D - 51 065 Köln

Tel. +49-(0)221-372445
Email: detlef.hennings@eclim.de
Internet: www.eclim.de

Optimierung der Raumakustik in passiv klimatisierten Räumen mit schallharter Decke

Studie im Rahmen des Förderprogramms 'Solar optimiertes Bauen'
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
Auftraggeber: Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig

August 2002

Zusammenfassung

Die Studie behandelt die raumakustische Optimierung von Kommunikationsräumen unter der zusätzlichen Bedingung, daß der Raum eine unverkleidete Betondecke besitzt, die als thermische Speichermasse wirksam ist. Für zwei exemplarische Räume, ein Besprechungsraum (29 m²) und einen Konferenzraum (138 m²) werden Lösungsansätze untersucht. Mittels Simulations-Software (CATT-Acoustic) werden Qualitätsmaße für die Sprachübertragung (Schwerpunktzeit, usw.) berechnet und simulierte Hörproben zu verschiedenen Raumvarianten erzeugt (Auralisation). Mit Hilfe der Qualitätsmaße werden optimierte Lösungsvarianten ermittelt. Anhand der Hörproben wird aurale Unterscheidbarkeit des akustischen Qualität verschiedener Varianten untersucht.

Die Studie zeigt für die untersuchten Räume drei zentrale Resultate :

1. Eine raumakustische Optimierung ist mit geeigneten Absorbern an den Wänden möglich, sowohl bei Teppichboden als auch bei schallhartem Boden.
2. Schallabsorber an den Wänden wirken besser als Absorber an Decke und Boden.
3. Auralisierte Hörproben sind als Entscheidungshilfe im Planungsprozeß nutzbar.

Abstract

This study deals with optimizing room acoustics in communication rooms, where a pure concrete ceiling is required for thermal storage and may not be covered by acoustic absorbers. Two rooms are examined, a meeting room (29 m²) and a conference room (138 m²).

A simulation software (CATT-Acoustic) is used to calculate speech transition quality measures (center time, etc.) and to create auralized samples for different room variants. Optimized solutions are selected by the quality measures. Auralization is used to test the aural discrimination of acoustical quality.

The study shows three main results for the rooms investigated :

1. Optimized room acoustics can be achieved by absorbers either at walls only or at walls and on ground.
2. Sound absorbers at walls show better effect than absorbing ceiling or ground.
3. Auralization samples can be helpful for decisions in building design.

Inhalt

1.	Einführung	7
	<i>Hintergrund</i>	7
	<i>Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes</i>	7
	<i>Anforderungen aus energetischer und thermischer Sicht</i>	7
	<i>Anforderungen aus akustischer Sicht</i>	8
	<i>Auralisation als Hilfsmittel in der Planung</i>	8
2.	Methodik und Vorgehensweise	9
3.	Die untersuchten Räume	10
	<i>Auswahl der Musterräume</i>	10
	<i>Auswahl der Materialien und Konstruktionen für die akustische Bedämpfung</i>	11
	<i>Die untersuchten Varianten</i>	13
	<i>Raum 1 : Besprechungszimmer</i>	14
	<i>Raum 2 : Konferenzraum</i>	16
4.	Berechnungs- und Simulations-Ergebnisse	18
	<i>Simulation und Qualitätsmaße</i>	18
	<i>Resultate für das Besprechungszimmer (Raum 1)</i>	19
	<i>Resultate für den Konferenzraum (Raum 2)</i>	21
	<i>Zusätzliche Berechnungen an einem synthetischen Raum</i>	24
	<i>Grenzen des Berechnungsverfahrens</i>	28
5.	Auralisation	31
	<i>Hörproben als Entscheidungshilfe im Planungsprozeß</i>	31
	<i>Die technische Realisierung der Hörproben</i>	32
	<i>Die auralisierten Raum-Modelle</i>	33
	<i>Allgemeine Hörtests</i>	35
	<i>Hörtests in simulierten Planungssituationen</i>	40
	<i>Anwendbarkeit und Grenzen der Auralisation</i>	44
6.	Résumé	47
	<i>Lösungen für Räume mit schallharter Decke</i>	47
	<i>Die Übertragbarkeit der Ergebnisse</i>	47
	<i>Eignung und Grenzen der Berechnungsverfahren</i>	48
	<i>Auralisation als Planungshilfsmittel</i>	48
	<i>Weitere Entwicklung</i>	49
	<i>Dank</i>	50
	Anhang	51
	<i>A 1 Inhalt der Auralisations-CD</i>	51
	<i>A 2 Hinweise zur Verwendung der Hörproben</i>	53
	<i>A 3 Literatur und Quellen</i>	54
	<i>A 4 Daten und Geometrie der modellierten Räume</i>	55
	<i>A 5 Absorptionseigenschaften der Konstruktionen und Materialien</i>	57
	<i>A 6 Die Modellierung der Personen</i>	58

1. Einführung

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. Geeignete Standardlösungen mit guter Raumakustik fehlen bisher für derartige Räume.

Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

In der vorliegenden Studie werden Räume untersucht, deren Funktion die Kommunikation der im Raum befindlichen Menschen miteinander ist, also beispielsweise Besprechungs- oder Konferenzräume. In solchen Räumen soll die Schallübertragung vom Sprecher zum Hörer im Raum besonders gut und störungsfrei erfolgen. Diese Räume werden im Folgenden 'Kommunikationsräume' genannt.

Zu unterscheiden sind diese Räume von solchen Räumen, in denen die Menschen im Raum einzeln jeweils mit Gesprächspartnern außerhalb des Raumes kommunizieren, wie z.B. in einem 'Call Center'. Dies stellt entgegengesetzte Anforderungen an den Raum, nämlich daß die Schallübertragung zwischen den Menschen im Raum stark gedämpft werden soll, der Raum also akustisch 'parzelliert' werden muß, um gegenseitige Störungen zu vermeiden. Diese Art von Räumen sind nicht Gegenstand der Studie.

Anforderungen aus energetischer und thermischer Sicht

Ausgangspunkt dieser Untersuchung sind Gebäude, die passiv klimatisiert sind. Das bedingt eine Reihe konstruktiver Merkmale¹. Von besonderer Bedeutung ist dabei neben der guten Steuerbarkeit der solaren Wärmegewinne durch Sonnenschutz-Einrichtungen, daß in den Innenräumen genügend große thermische Speichermassen vorhanden sind, die zudem großflächig in thermischem Kontakt mit dem Innenraum sein müssen. In den meisten Fällen ist die praktikable Lösung eine massive Beton-Geschoßdecke, die vom darunterliegenden Innenraum frei zugänglich ist (d.h. maximal mit einer thermisch gut leitfähigen Putzschicht bedeckt ist). So kann die Decke als Wärme-Zwischenspeicher wirksam sein, beispielsweise um tagsüber überschüssige Wärme aufzunehmen und sie nachts wieder abzugeben. Darüber hinaus kann eine solche Decke mittels eingegossener Rohre 'aktiviert' werden, zum Beispiel um über einen Wasserkreislauf und einen Erdreich-Wärmetauscher den Innenraum aktiv zu kühlen, falls die Wärmegewinne im Raum für passive Klimatisierung zu groß sind.

¹ Vgl. dazu [BAK, 1996], [Hennings, 1998], [Hennings, Knissel, 2000].

Die notwendige freie Zugänglichkeit der massiven Raumdecke verbietet es, die Decke mit Bauteilen oder Beschichtungen zur akustischen Bedämpfung des Raumes zu bedecken, da diese aufgrund ihrer akustischen Funktion nicht massiv sein können und deshalb thermisch schlecht leiten. Die akustisch wirksamen Bauteile oder Schichten würden also den Innenraum thermisch von der Geschoßdecke und damit von der Speichermasse abtrennen, und außerdem den thermischen Strahlungsaustausch zwischen der Speichermassen-Oberfläche und anderen Oberflächen im Raum unterbinden. Dies würde die passive Klimatisierung sehr erschweren oder gar weitgehend unterbinden.

Anforderungen aus akustischer Sicht

Räume für menschliche Kommunikation sollen selbstverständlich konstruktiv dieser Funktion förderlich sein. Neben dem guten Sichtkontakt zwischen den Gesprächs-Teilnehmern zählt dazu auch, daß der Raum akustisch eine Einheit sein soll. Das bedeutet, daß der Schall zwischen beliebigen Punkten im Raum direkt, unbehindert und nur wenig abgeschwächt und verfälscht vom Sprecher zum Hörer gelangen kann.

Aus dieser allgemeinen Anforderung lassen sich eine Reihe von akustischen Kriterien ableiten, nach denen Räume bewertet werden können:

- Die Nachhallzeit soll, der Raumnutzung angemessen, relativ kurz sein.
- Der Nachhall soll im Frequenzspektrum ausgeglichen sein.
- Die Sprachverständlichkeit soll mittels der frühen Reflektionen des Schalls an Raumbooberflächen gesteigert werden.

Die akustischen Anforderungen werden im Folgenden weiter konkretisiert und mittels geeigneter Meßgrößen bewertet.

Auralisation als Hilfsmittel in der Planung

Zusätzlich zur numerischen Analyse soll die Eignung der Auralisation, also simulierter Hörproben aus den modellierten Räumen, als Entscheidungshilfe erprobt werden. Diese Methode macht die Simulationsresultate auch denjenigen Mitgliedern des Planungsteams direkt zugänglich, die keine besonderen akustischen Fachkenntnisse besitzen, wie in der Regel Bauherren und Architekten. So soll diesem Personenkreis eine aktivere Teilnahme an Entscheidungen in der raumakustischen Planung ermöglicht werden.

2. Methodik und Vorgehensweise

Die Problemstellung wird an zwei unterschiedlich großen Räumen untersucht, einem 29 m² großen Besprechungszimmer und einem Konferenzraum mit 138 m² Grundfläche. In beiden Räumen wird von sparsamer, minimal notwendiger Möblierung ausgegangen, um möglichst kritische Fälle mit geringer Bedämpfung durch das Inventar zu berücksichtigen.

Die untersuchten Räume werden zunächst in akustisch unbehandelter Form betrachtet. Anhand einfacher Nachhallzeit-Berechnungen werden dann die notwendigen akustischen Maßnahmen ermittelt, um spektral ausgeglichene Nachhallzeiten zu erhalten, die sowohl bei geringer als auch bei stärkerer Besetzung des Raums das Toleranzfeld nach DIN 18 041 soweit möglich einhalten.

Die ausgewählten Räume werden in einer Raumakustik-Simulationssoftware nachgebildet. Die zuvor definierten Lösungsvarianten werden darin mittels numerischer Simulation der Schallausbreitung im Raum detailliert untersucht und bewertet. Für typische Positionen von Schallquelle (Sprecher) und Schallempfänger (Hörer) werden Raum-Impulsantworten und daraus abgeleitete Bewertungsgrößen berechnet. Mithilfe abgeleiteter Maße für die Sprachübertragungsqualität werden die Lösungsvarianten bewertet und untereinander verglichen.

Aus den Bewertungs-Resultaten werden Hinweise und Empfehlungen für die akustische Auslegung von Kommunikationsräumen abgeleitet.

Um die Auralisation als Entscheidungshilfe für den Planungsprozeß zu untersuchen, werden aus den Raumimpulsantworten rechnerisch binaurale Hörproben hergestellt. Diese Hörproben für Varianten des jeweiligen Testraumes mit unterschiedlichen akustischen Maßnahmen werden über Kopfhörer verschiedenen Probanden vorgespielt. Die Versuchspersonen sollen anhand der Hörproben die Unterschiede der akustischen Raumeigenschaften beschreiben und die akustische Qualität der jeweiligen Raum-Variante beurteilen.

Aus dem Vergleich der Beurteilung mittels Hörproben mit Resultaten der numerischen Bewertung wird die Eignung der Auralisation der raumakustischen Eigenschaften als Planungs- und Entscheidungs-Hilfe eingeschätzt.

3. Die untersuchten Räume

Auswahl der Musterräume

Die Musterräume für die Untersuchungen wurden in Anlehnung an Räume des im Bau befindlichen EnergieForum-Gebäudes in Berlin gewählt. Zum Zeitpunkt der Raumwahl war noch keine Entscheidung über die Nutzung der einzelnen Räume gefallen. Es wurden zwei unterschiedlich große Räume ausgewählt, die als Kommunikationsräume geeignet erscheinen:

1. ein kleinerer Raum im 1. OG im Format eines größeren Einzelbüros, der als Besprechungsraum nutzbar ist.
Raum 1: 'Besprechungszimmer'
2. ein größerer Raum im EG, der sich für die Nutzung als Konferenzraum eignet
Raum 2: 'Konferenzraum'

Raum		Raum 1: 'Besprechungszimmer'	Raum 2: 'Konferenzraum'
Nettogrundfläche	m ²	29	138
Nettovolumen	m ³	87	413
Länge	m	5.10	10.20
Breite	m	5.70	13.50
Höhe	m	3.00	3.00

Tabelle 3.1 Die geometrischen Daten der ausgewählten Räume²

In geometrischen Details wurden die Räume für die Berechnungen gegenüber den Original-Räumen vereinfacht, um den Eingabe- und Rechenaufwand zu verringern und um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Räume in anderen Gebäuden zu verbessern. So wurden einige Säulen im Konferenzraum weggelassen und die teilweise schiefwinklige Fenstergeometrie wurde vereinfacht.

Teilweise abweichend von den Original-Räumen wird angenommen, daß die Fenster von Brüstungshöhe (0.8 m) bis unter die Decke reichen. Dies entspricht einer guten Tageslichtversorgung bei gleichzeitiger Vermeidung zusätzlicher Wärmegewinne durch tiefliegende Glasflächen. Der modellierte Konferenzraum besitzt gegenüber der Fensterwand Oberlichter, die von 2 m Höhe bis unter die Raumdecke reichen.

² Weitere Information zu den Räumen: siehe Anhang A 4.

Die 'akustisch unbehandelten' Basis-Varianten der Räume

Der 'akustisch unbehandelte' Zustand der betrachteten Räume entspricht einem typischen Innenausbau-Zustand von Räumen in Bürogebäuden, wenn keine spezifische Nutzungsart berücksichtigt ist. Die Raumdecke entspricht der hier grundlegenden Anforderung der thermischen Speicherfähigkeit. Für den Boden werden zwei Varianten mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften berücksichtigt. Sowohl Außen- als auch Innenwände werden als verputztes und tapeziertes Mauerwerk angenommen³. Die Fenster werden als doppelverglast angenommen, was akustisch gleichwertig einer Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung ist.

Bauteil	Ausführungsart
Boden, Variante 1	Linoleum oder Kunststoff auf Estrich
Boden, Variante 2	Teppichboden mit Gummischicht auf Estrich
Decke	Beton, verputzt und gestrichen
Fenster	2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung / Doppelverglasung
Außenwand	Mauerwerk, verputzt und tapeziert
Innenwand	Mauerwerk, verputzt und tapeziert

Tabelle 3.2 Die Oberflächen der ausgewählten Räume im akustisch unbehandelten Zustand.

Darüber hinaus wurde angenommen, daß sich im Raum jeweils ein der Raumgröße angemessener Tisch aus massivem Holz befindet. Um den Tisch sitzende Personen sind mit ihren Absorptions-Eigenschaften berücksichtigt⁴.

Auswahl der Materialien und Konstruktionen für die akustische Bedämpfung

Die für die akustische Behandlung der Räume eingesetzten Materialien bzw. Konstruktionen müssen einigen Anforderungen genügen, damit sie ihre Funktion erfüllen können:

- Die Stärke des Aufbaus soll gering sein.
Die nutzbare Fläche der Räume soll nicht durch dicke akustische Bedämpfungs-Konstruktionen eingeschränkt werden. Insbesondere für Tiefenabsorber schränkt dies die Auswahl ein. Als Obergrenze für die Stärke wurde etwa 10 cm angesetzt.

³ Innenwände in Leichtbauweise wären bei tiefen Frequenzen weniger schallhart. Die Bauweise in Mauerwerk wurden als die Variante mit höheren Anforderungen an die akustischen Maßnahmen ausgewählt.

⁴ Zur Modellierung der Personen siehe Anhang A 6.

- Es sollen keine Elemente zur akustischen Bedämpfung in den Raum hineinragen. So wird weder die akustische Einheit des Raums unterbrochen, noch wird die Nutzbarkeit des Raumvolumens eingeschränkt. Auch wird die Raumbelichtung nicht beeinträchtigt.

Für die akustische Behandlungen der Wände wurden exemplarisch zwei Konstruktionen ausgewählt

1. Verbundplatten-Resonatoren (VPR)⁵ als Tiefen-Absorber. Diese bestehen aus zwei Metallplatten, zwischen denen sich eine Schicht aus offenporigem Melaminharz-Schaumstoff befindet. Sie wirken als stark bedämpfte, breitbandig Tiefen-absorbieren-de Resonatoren und zusätzlich aufgrund seitlichen Schalleintritts als – weniger wirksame – Breitband-Absorber. Die glatte und feste Metall-Oberfläche, die bei entsprechender Beschichtung als Wandtafel oder als Projektionsfläche genutzt werden kann, prädestiniert Verbundplatten-Resonatoren besonders für die Wände von Kommunikationsräumen.
2. Eine Beschichtung auf Zellulose-Basis als breitbandiger Absorber für hohe und mittlere Frequenzen⁶. Mit der Wahl der Schichtdicke (bis etwa 100 mm) läßt sich der Bereich der absorbierten Frequenzen einstellen. Dünnere Schichten wirken als Höhen-Absorber. Mit zunehmender Schichtdicke verschiebt sich der Schwerpunkt der Absorption zu tieferen Frequenzen hin.

Diese Untersuchung ist zwar auf die beiden genannten Schallabsorber beschränkt, jedoch können selbstverständlich auch andere Konstruktionen verwendet werden, wenn sie geeignete Eigenschaften besitzen.⁷

Analog zu den Basisvarianten werden auch die 'richtig bedämpften' Räume in zwei Alternativen des Bodenbelags bei der akustischen Optimierung berücksichtigt.

1. Ein Linoleumbelag als Repräsentant für weitgehend schallharte Böden.
2. Ein Teppichboden mit Gummiunterlage als Vertreter für Böden mit recht hoher Absorption hoher Frequenzen.

⁵ Verbundplatten-Resonatoren wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt (vgl. [Fuchs, Zha, 1996]). Am Markt sind diese Bauteile bisher nicht leicht und nur zu relativ hohen Kosten erhältlich. Jedoch werden auch Alternativen mit ähnlichen Eigenschaften angeboten (vgl. [PTB, 2001]).

⁶ Für die Berechnungen wurden die Daten des Produktes 'Sonaspray' verwendet, entnommen aus der Datenbank der Physikalisch-technischen Bundesanstalt [PTB, 2001].

⁷ Die Absorptionsdaten der verwendeten Materialien und Konstruktionen sind im Anhang A 5 zusammengestellt.

Die untersuchten Varianten

Basierend auf den Basis-Varianten der Räume sind zwei, als 'richtig bedämpft' bezeichnete, Varianten definiert, in denen mit Hilfe der ausgewählten Konstruktionen die Sabine'schen Nachhallzeiten so eingestellt sind, daß sie sowohl bei geringerer als auch bei stärkerer Besetzung das Toleranzfeld nach DIN 18 041 für die Oktavbänder von 128 Hz bis 4 kHz einhalten. Die Flächenanteile der absorbierenden Konstruktionen und die Schichtdicken der Zellulose-Beschichtung sind entsprechend dimensioniert. In Tabelle 3.3 sind die untersuchten Raum-Varianten aufgeführt.

	Decke	Boden	Wände, Teil 1	Wände, Teil 2	Wände, Teil 3
Basis-Variante 1	Beton verputzt, gestrichen	Linoleum auf Estrich	verputzt und tapeziert	-	-
Basis-Variante 2	Beton verputzt, gestrichen	Teppich mit Gummiunterlage	verputzt und tapeziert	-	-
'richtig bedämpfte' ⁸ Variante 1	Beton verputzt, gestrichen	Linoleum auf Estrich	verputzt und tapeziert	Verbundplatten-Resonatoren	Zellulose-Beschichtung
'richtig bedämpfte' Variante 2	Beton verputzt, gestrichen	Teppich mit Gummiunterlage	verputzt und tapeziert	Verbundplatten-Resonatoren	-

Tabelle 3.3 Die untersuchten Varianten der Räume

⁸ Als 'richtig bedämpft' werden hier Varianten bezeichnet, deren Nachhallzeiten T_{Sab} in allen Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz sowohl bei geringer als auch stärkerer Besetzung innerhalb des Toleranzfeldes nach DIN 18 041 liegen (soweit dies möglich ist).

Raum 1 : Besprechungszimmer

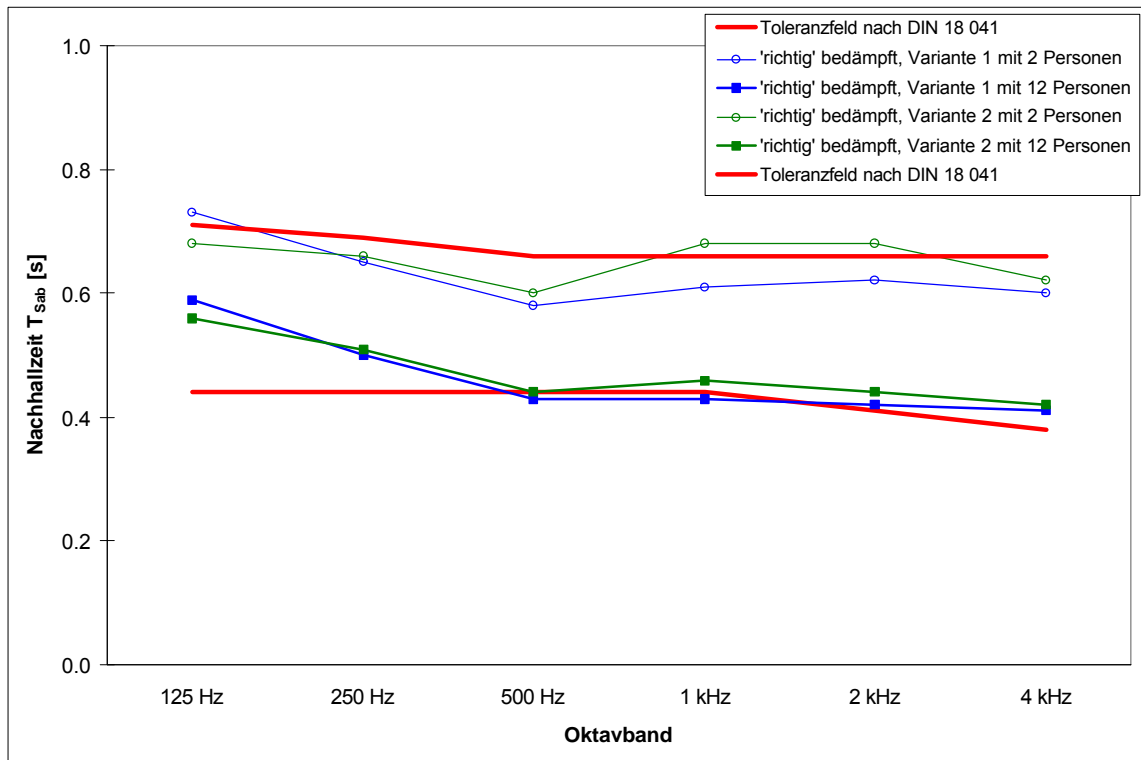
Aus Tabelle 3.4 ist ersichtlich, daß die akustisch unbehandelten Basis-Varianten 1 und 2 sowohl mit geringer Besetzung als auch mit 12 Personen bei tiefen Frequenzen immer und bei hohen Frequenzen zumindest teilweise deutlich zu große Nachhallzeiten aufweisen.

Raum 1 (87 m³)		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
<i>Toleranzfeld nach DIN 18 041</i>	<i>maximal</i>	0.71	0.69	0.66	0.66	0.66	0.66
	<i>minimal</i>	0.44	0.44	0.44	0.44	0.41	0.38
Basis, Variante 1	2 Personen	3.16	2.85	2.30	1.92	1.61	1.47
	12 Personen	1.58	1.24	0.97	0.82	0.72	0.69
Basis, Variante 2	2 Personen	2.97	2.02	1.13	0.93	0.82	0.68
	12 Personen	1.53	1.05	0.67	0.56	0.50	0.44
'richtig' bedämpft, Variante 1	2 Personen	0.73	0.65	0.58	0.61	0.62	0.60
	12 Personen	0.59	0.50	0.43	0.43	0.42	0.41
'richtig' bedämpft, Variante 2	2 Personen	0.68	0.66	0.60	0.68	0.68	0.62
	12 Personen	0.56	0.51	0.44	0.46	0.44	0.42

Tabelle 3.4 berechnete Nachhallzeiten T_{Sab} für verschiedene Varianten des Besprechungszimmers (Raum 1, Volumen 87 m³)

Die Tabelle ebenso wie Grafik 3.1 zeigen aber auch, daß die 'richtig bedämpften' Raumvarianten sowohl mit geringer als auch mit stärkerer Besetzung das DIN-Toleranzfeld einhalten, soweit dies überhaupt möglich ist.

Damit ist für diesen Raum gezeigt, daß die spektral ausgewogene Bedämpfung auf der Nutzung angemessene Nachhallzeiten ohne Inanspruchnahme der Raumdecke sich mit verfügbaren Schallabsorbern erfüllen läßt.



Grafik 3.1 Vergleich der berechneten Nachhallzeiten T_{Sab} für die 'richtig bedämpften' Varianten des Besprechungszimmers (Raum 1, Volumen 87 m³) mit dem Toleranzfeld nach DIN 18 041.

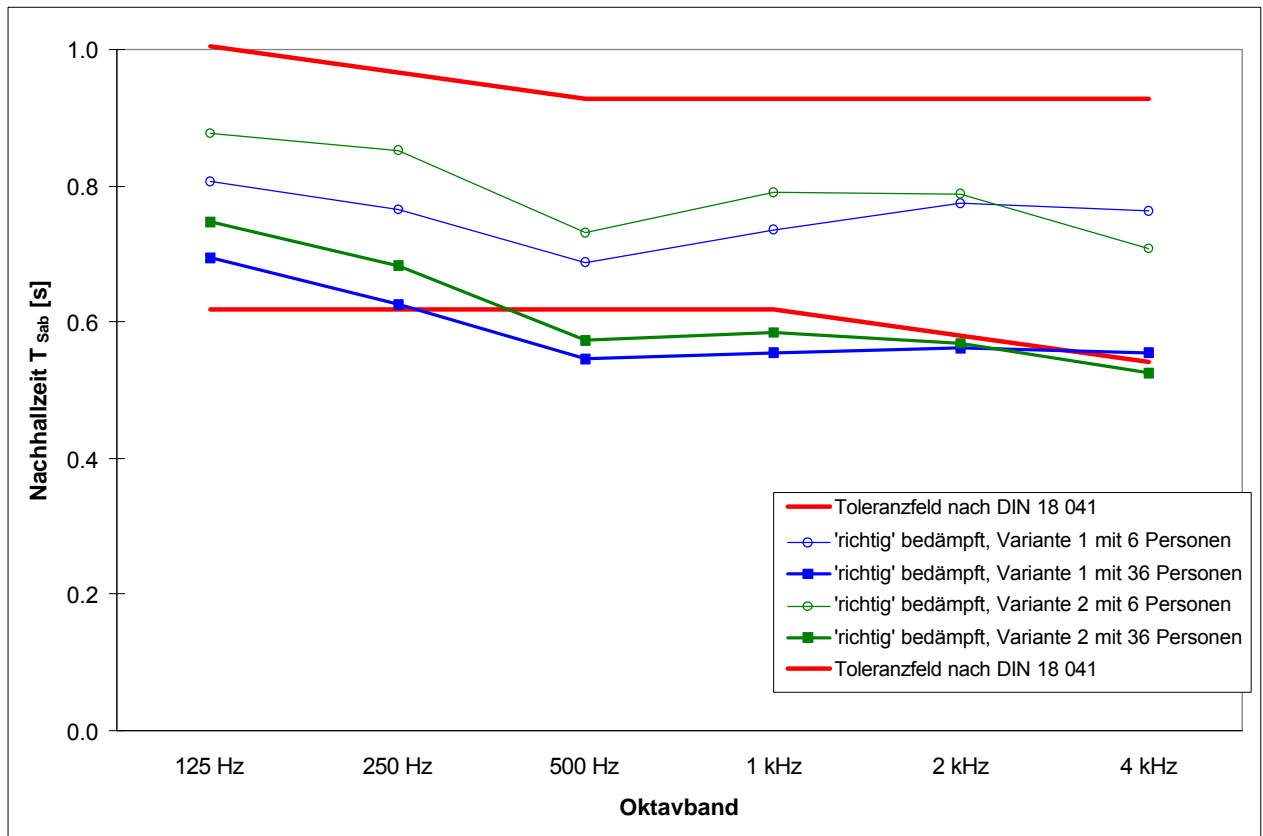
Raum 2 : Konferenzraum

Auch bei diesem Raum sind die Basis-Varianten im wenig besetzten Zustand für die Kommunikation wenig geeignet, und auch im stärker besetzten Zustand insbesondere bei tiefen Frequenzen zu hallig.

Raum 2 (413 m³)		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Toleranzfeld nach DIN 18 041	<i>maximal</i>	1.00	0.97	0.93	0.93	0.93	0.93
	<i>minimal</i>	0.62	0.62	0.62	0.62	0.58	0.54
Basis-Variante 1	6 Personen	2.45	2.51	2.26	2.04	1.87	1.57
	36 Personen	1.65	1.45	1.22	1.07	0.98	0.89
Basis-Variante 2	6 Personen	2.34	1.85	1.15	0.98	0.90	0.75
	36 Personen	1.59	1.20	0.80	0.68	0.63	0.55
'richtig' bedämpfte Variante 1	6 Personen	0.81	0.76	0.69	0.74	0.78	0.76
	36 Personen	0.69	0.63	0.55	0.55	0.56	0.56
'richtig' bedämpfte Variante 2	6 Personen	0.88	0.85	0.73	0.79	0.79	0.71
	36 Personen	0.75	0.68	0.57	0.58	0.57	0.53

Tabelle 3.5 berechnete Nachhallzeiten T_{Sab} für verschiedene Varianten des Konferenzraum (Raum 2, Volumen 413 m³)

Aus Grafik 3.2 ist ersichtlich, daß die 'richtig bedämpften' Varianten dieses Raumes an den Anforderungen nach DIN 18 041 gemessen etwas überbedämpft ist, denn die Nachhallzeiten bei 36 Personen Besetzung unterschreiten das Toleranzfeld teilweise. Diese leichte Überdimensionierung der Absorber wurde gewählt, weil bei diesem flachen, relativ großflächigen Raum die Wandflächen bezogen auf das Raumvolumen relativ klein sind, und deshalb in der bedämpften Variante 1 nahezu die gesamte Wandfläche in Anspruch genommen werden muß. So ist mit einem Zuschlag sichergestellt, daß der Raum 'richtig' bedämpft werden kann. Zudem kommt diese etwas stärkere Bedämpfung der Bestrebung entgegen, in der zukünftigen neuformulierten DIN-Norm etwas kürzere Nachhallzeiten zu empfehlen als bisher. Andererseits ist es ohne weiteres möglich, den Raum, falls gewünscht, durch Weglassen eines Teils der Absorberflächen etwas zu entdämpfen.



Grafik 3.2 Vergleich der berechneten Nachhallzeiten T_{sab} für die 'richtig bedämpften' Varianten des Konferenzraums (Raum 2, Volumen 413 m³) mit dem Toleranzfeld nach DIN 18 041.

4. Berechnungs- und Simulations-Ergebnisse

Simulation und Qualitätsmaße

Mit der Akustik-Simulations-Software 'CATT-Acoustic'⁹ wurden detaillierte Berechnungen für die ausgewählten Raum- Varianten vorgenommen.

CATT-Acoustic erlaubt es, Raumimpulsantworten für die simulierten Räume und daraus abgeleitete Größen zu berechnen. Als Maße für die Sprachübertragungs-Qualität wurden insbesondere berechnet:

- Der Deutlichkeitsgrad (D_{50})
gibt an, welcher Anteil der gesamten Schallenergie mit höchsten 50 ms Verzögerung gegenüber der ersten Wellenfront¹⁰ beim Hörer eintrifft. Je höher dieser Anteil, desto deutlicher, weniger 'verschmiert', ist die Sprache. Für Sprache wird ein Deutlichkeitsgrad von mindestens 50% gefordert, was einer Silbenverständlichkeit von > 70% entspricht.
- Die Schwerpunktzeit der Raumimpulsantwort (T_s)
bewertet ebenfalls die Verzögerungen der einzelnen Energieanteile des Schalls. Anders als beim Deutlichkeitsgrad wird keine scharfe Grenze zwischen nützlichen und schädlichen Schallanteilen gesetzt, sondern in einem Integral über alle Schallanteile wird jeder Anteil mit der jeweiligen Verzögerung gewichtet. Als Voraussetzung für gute Sprachverständlichkeit soll die Schwerpunktzeit < 80 ms betragen. Sehr gute Werte unterschreiten 50 ms deutlich.
- Der Sprachübertragungsindex 'Rapid Speech Transition Index' (RASTI)
beruht auf Modulations-Übertragungs-Funktionen für 500 Hz und 2 kHz. Die Amplitudenmodulation der Signale mit niedrigen Modulationsfrequenzen (ca. 1 .. 10 Hz) wird durch das zeitliche 'Verschmieren' abgeschwächt. Aus dieser Abschwächung wird das Maß RASTI abgeleitet. Für eine gute Sprachverständlichkeit wird ein RASTI von mindestens 50% gefordert. Sehr gute Werte liegen bei 70% und höher.

Zudem wurde die aus Raumimpulsantworten abgeleitete T-30-Nachhallzeit als explizit berechnete Nachhallzeit einbezogen¹¹.

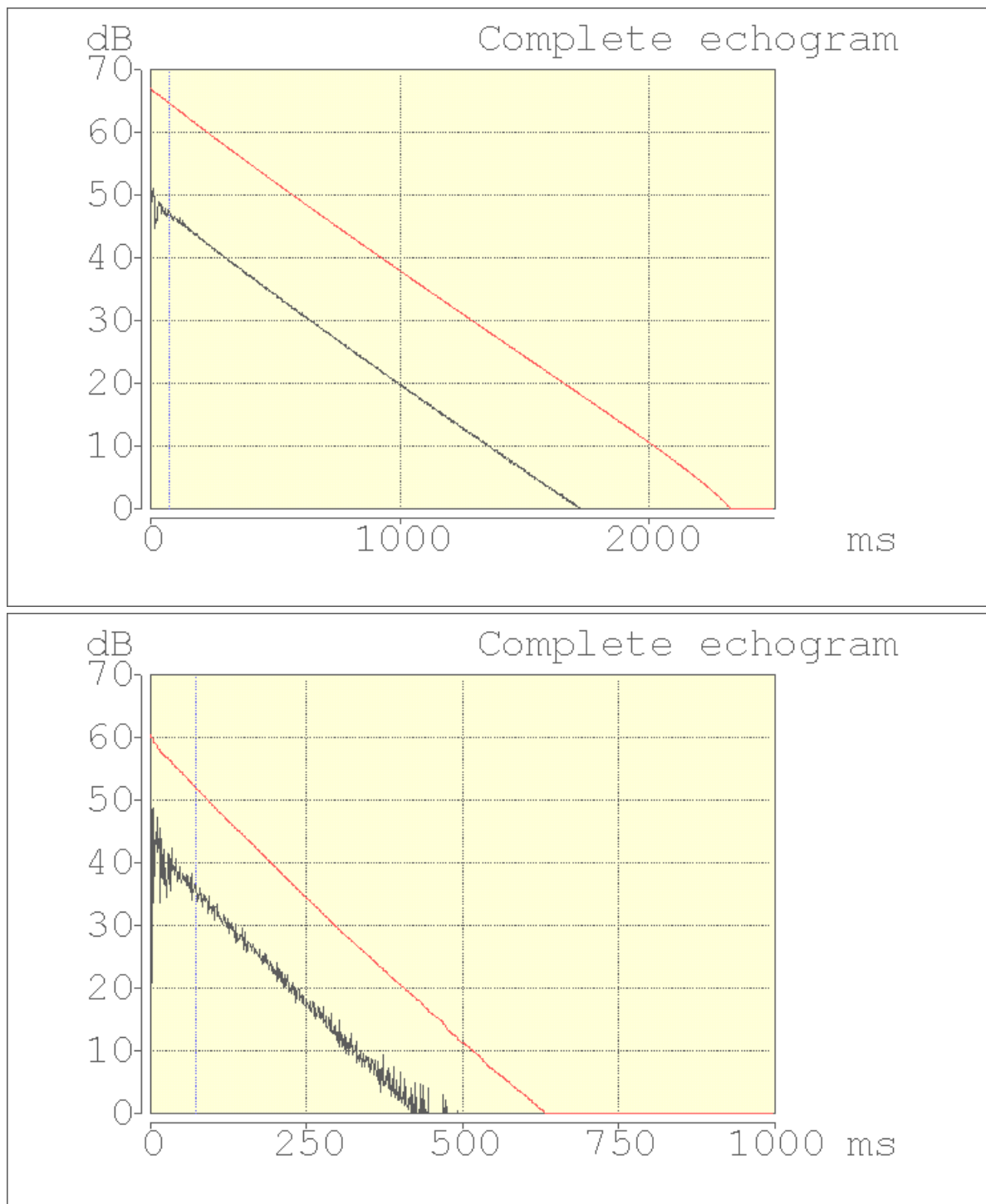
Anhand von Feldern dieser Größen in der typischen Hörer-Ebene läßt sich die Sprachübertragungs-Qualität im gesamten Raum einschätzen.

⁹ Vgl. [CATT, 2000].

¹⁰ Verzögerungen werden bei den Qualitätsmaßen immer auf die erste eintreffende Wellenfront bezogen, so daß die Maße unabhängig von der Entfernung Schallquelle-Empfänger sind.

¹¹ Die T-30-Nachhallzeiten entsprechen einem least-squares-fit über 30 dB an den Pegelbereich -5 dB bis -35 dB des abklingenden Nachhalls, der verdoppelt und so auf 60 dB Pegelabfall bezogen wird.

Resultate für das Besprechungszimmer (Raum 1)



Grafik 4.1 Echogramme der Basis-Variante 1 (Linoleum-Boden), Bild oben, und der 'richtig bedämpften' Variante 1, Bild unten. Beide Varianten mit 2 Personen besetzt.

Für verschiedene Varianten des Besprechungsraums wurden Raumimpulsantworten und abgeleitete Sprachübertragungs-Qualitätskriterien berechnet. In Grafik 4.1 sind exemplarisch Echogramme¹² zweier Varianten dargestellt.

Bei den Berechnungen wurde von zwei typischen Nutzungs-Situationen ausgegangen:

1. einer kleinen Besprechung zweier Personen.
2. einer Gruppen-Besprechung mit 12 Personen, die um den Tisch verteilt sitzen.

Raum 1 (87 m³)	Nutzung	D ₅₀ 500 Hz	D ₅₀ 2 kHz	T _s 500 Hz	T _s 2 kHz	RASTI
<i>Mindestanforderung</i>		> 50%	> 50%	< 80 ms	< 80 ms	> 50%
Basis-Variante 1 (Linoleum-Boden)	2 Personen	33.5%	43.1%	129.0 ms	92.1 ms	49.0%
	12 Personen	56.9%	64.8%	61.0 ms	47.6 ms	64.0%
Basis-Variante 2 (Teppichboden)	2 Personen	50.2%	61.2%	75.0 ms	56.4 ms	60.4%
	12 Personen	65.2%	73.5%	48.0 ms	38.3 ms	68.4%
'richtig bedämpfte' Variante 1 (Linoleum-Boden)	2 Personen	81.6%	76.2%	27.4 ms	33.0 ms	74.3%
	12 Personen	89.5%	87.2%	18.6 ms	22.2 ms	81.1%
'richtig bedämpfte' Variante 2 (Teppichboden)	2 Personen	76.1%	69.8%	32.8 ms	42.0 ms	70.9%
	12 Personen	84.7%	78.2%	24.8 ms	31.5 ms	75.9%
<i>Zum Vergleich:</i>						
Variante mit Teppichboden und Akustikdecke	2 Personen	66.8%	65.8%	46.5 ms	48.4 ms	66.1%
	12 Personen	76.4%	76.2%	34.0 ms	34.1 ms	72.5%

Tabelle 4.1 Berechnete Sprachübertragungs-Qualitätskriterien für einander gegenüberliegende Sprecher- und Hörerpositionen bei verschiedenen Varianten des Besprechungszimmers (Raum 1, Volumen 87 m³)

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß die Basis-Varianten die Qualitäts-Kriterien nicht oder soeben erfüllen. Dagegen liefern die 'richtig bedämpften' Varianten durchweg sehr gute Werte der Qualitäts-Maße. Die Variante mit schallhartem Boden ist dabei der Variante mit Teppichboden überlegen. Noch etwas ungünstiger fallen die Qualitäts-Maße bei einer zum Vergleich angeführten, ebenfalls 'richtig bedämpften' Variante mit Teppichboden und Akustikdecke aus.

¹² Echogramm = grafische Darstellung des Zeitverlaufs der Schall-Leistung in der Impulsantwort

Resultate für den Konferenzraum (Raum 2)

Die Raumimpulsantworten und abgeleitete Größen wurden für verschiedene (sinnvolle) Sprecher- und Hörer-Positionen im Raum berechnet. Dabei wurde von zwei typischen Nutzungs-Situationen ausgegangen:

1. einer Projektbesprechung mit 6 Personen, wobei der große Konferenztisch zum Ausbreiten von Unterlagen und Plänen genutzt wird und dementsprechend die Personen im ganzen Raum um den Tisch verteilt sind.
2. einer Konferenz mit 36 Personen, die gleichmäßig um den Tisch verteilt sitzen.

In beiden Fällen ist die Kommunikation über den gesamten Raum erforderlich. Deshalb wurden bevorzugt die kritischeren Fälle mit weit auseinanderliegenden Sprecher- und Hörer-Positionen untersucht. In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse für verschiedene Raum-Varianten zusammengestellt.

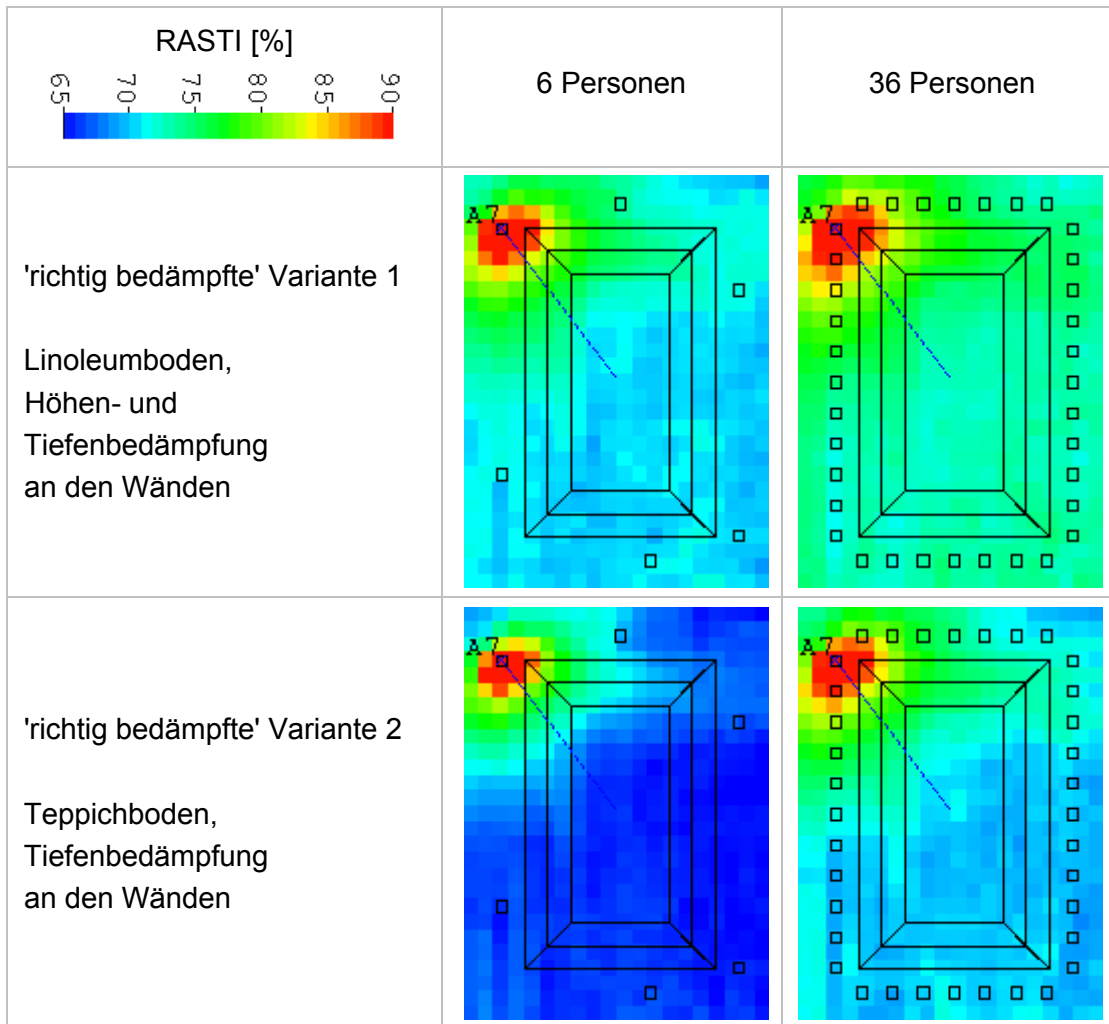
Raum 2 (413 m ³)	Nutzung	D ₅₀	D ₅₀	T _s	T _s	RASTI
		500 Hz	2 kHz	500 Hz	2 kHz	
<i>Mindestanforderung</i>		> 50%	> 50%	< 80 ms	< 80 ms	> 50%
Basis-Variante 1 (Linoleum-Boden)	6 Personen	29.4%	35.1%	164.6 ms	124.7 ms	44.5%
	36 Personen	46.7%	52.3%	87.1 ms	70.0 ms	56.7%
Basis-Variante 2 (Teppichboden)	6 Personen	46.2%	51.8%	90.0 ms	73.0 ms	56.0%
	36 Personen	59.4%	62.4%	63.7 ms	55.5 ms	62.7%
'richtig bedämpfte' Variante 1 (Linoleum-Boden)	6 Personen	75.4%	71.3%	33.3 ms	38.2 ms	71.3%
	36 Personen	81.2%	75.3%	27.6 ms	31.7 ms	74.8%
'richtig bedämpfte' Variante 2 (Teppichboden)	6 Personen	73.8%	61.8%	37.3 ms	54.9 ms	67.4%
	36 Personen	81.1%	70.2%	28.7 ms	41.7 ms	72.3%
<i>Zum Vergleich:</i>						
Variante mit Teppichboden und Akustikdecke	6 Personen	58.4%	59.0%	60.8 ms	58.9 ms	62.1%
	36 Personen	70.1%	68.6%	46.5 ms	46.0 ms	67.4%

Tabelle 4.2 Berechnete Sprachübertragungs-Qualitätskriterien für voneinander entfernte Sprecher- und Hörerpositionen bei den Varianten des Konferenzraums

Aus Tabelle 4.2 läßt sich ablesen, daß die Basis-Varianten den Sprachübertragungs-Qualitätskriterien nach zu urteilen als Kommunikationsräume wenig geeignet sind. Die Basis-Variante 1 (ohne dämpfende Oberflächen) ist bei geringer Besetzung ungeeignet. Bei stärkerer Besetzung erfüllt sie die Mindestanforderungen nur für hohen Frequenzen. Ähnliches gilt für die Basis-Variante 2 (mit Teppichboden). Auch hier ist die Eignung Besetzungs-

abhängig. Bei stärkerer Besetzung ist die die Basis-Variante 2 brauchbar, wenngleich keineswegs optimal.

Die 'richtig bedämpften' Varianten sind den Qualitätskriterien zufolge sehr gut als Kommunikationsräume geeignet. Die Tabellenwerte beziehen sich nur auf ein Paar aus Sprecher- und Hörer-Ort. Um Aussagen über den gesamten Raum zu erhalten, müssen die Felder der Qualitätsmaße berechnet werden. Exemplarisch sind in Grafik 4.2 Felder des Sprachübertragungsindex RASTI in der Hörer-Ebene dargestellt.



Grafik 4.2 Felder des Sprachübertragungsindex RASTI in der Hörer-Ebene der 'richtig bedämpften' Varianten des Konferenzraumes bei 6 und bei 36 Personen Besetzung.

Daraus läßt sich ablesen, daß die Sprachverständlichkeit bei den 'richtig bedämften' Raumversionen im gesamten Raum gleichmäßig auf hohem Niveau ist. Die Werte liegen flächendeckend bei 65% bis 75% und steigen in Sprechernähe auf über 90% an. Damit ist im gesamten Raum eine sehr gute Sprachverständlichkeit gewährleistet, wobei die Variante 1 sich der Variante 2 in der Sprachverständlichkeit leicht überlegen zeigt.

Zusätzliche Berechnungen an einem synthetischen Raum

Bei beiden untersuchten Raumgeometrien, Besprechungszimmer (Raum 1) und Konferenzraum (Raum 2), zeigt sich in den 'richtig bedämpften' Varianten eine Tendenz, daß die Version mit schallhartem Boden und Decke der Version mit Teppichboden und harter Decke und diese wiederum der Version mit Teppichboden und Akustikdecke überlegen sind. Dies läßt vermuten, daß es für Kommunikationsräume vorteilhaft ist, die Schall-absorbierenden Oberflächen bevorzugt an den Wänden, und nicht an Boden und Decke anzubringen¹³.

Da die Räume 1 und 2 mit Absorptions-Daten realer Materialien und Bauelemente untersucht wurden, waren die äquivalenten Absorberflächen der verglichenen Varianten nicht exakt gleich, so daß dem genannten Effekt der Anordnung der Absorber auch Auswirkungen unterschiedlicher Absorbermengen überlagert sein können.

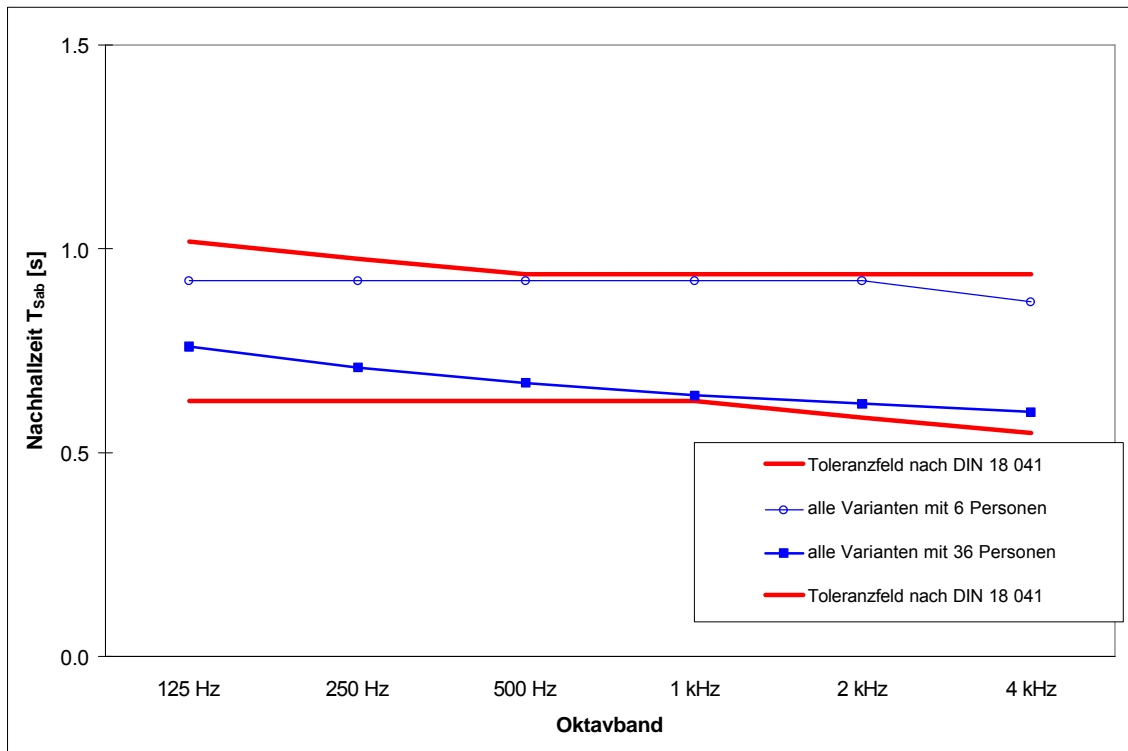
Um diese Überlagerung zweier Effekte auszuschließen, wurde ein dritter Raum (Raum 3) untersucht, dessen Oberflächen mit synthetisch definierten Materialeigenschaften belegt waren. Die Geometrie von Raum 3 ist dem Konferenzraum ähnlich. Die Materialdaten sind ebenfalls an die zuvor verwendeten Materialien angelehnt, jedoch wurden die einzelnen Absorptionswerte so 'feinjustiert', das sich für drei verglichene Raum-Varianten exakt die gleichen äquivalenten Absorberflächen und damit auch gleiche Sabine'sche Nachhallzeiten T_s ergeben. Die drei verglichenen Varianten sind:

1. der Raum mit schallhartem Boden und schallharter Decke, Absorber für tiefe und für hohe Frequenzen an den Wänden
2. der Raum mit quasi-Teppich-Boden und schallharter Decke, Absorber für tiefe Frequenzen an den Wänden. Der quasi-Teppich-Boden absorbiert vorwiegend hohe Frequenzen.
3. der Raum mit quasi-Teppich-Boden und quasi-Akustik-Decke. Der quasi-Teppich-Boden absorbiert vorwiegend hohe Frequenzen, die quasi-Akustik-Decke überwiegend tiefe Frequenzen. Die Wände sind schallhart.

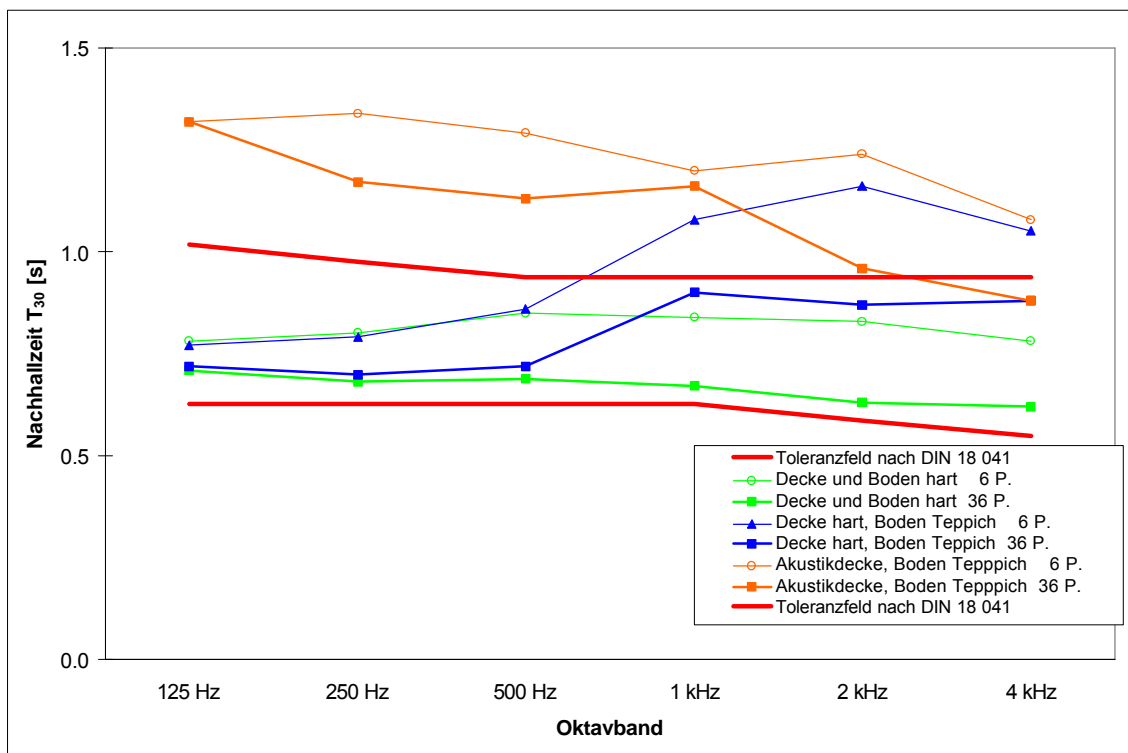
In den Grafiken 4.3 bis 4.6 sind Berechnungs-Ergebnisse für die synthetischen Raum-Varianten jeweils in Abhängigkeit vom Oktavband dargestellt.

Grafik 4.3 zeigt die für alle Varianten gleichen Sabine'schen Nachhallzeiten, die vollständig im Toleranzfeld nach DIN 18 041 liegen.

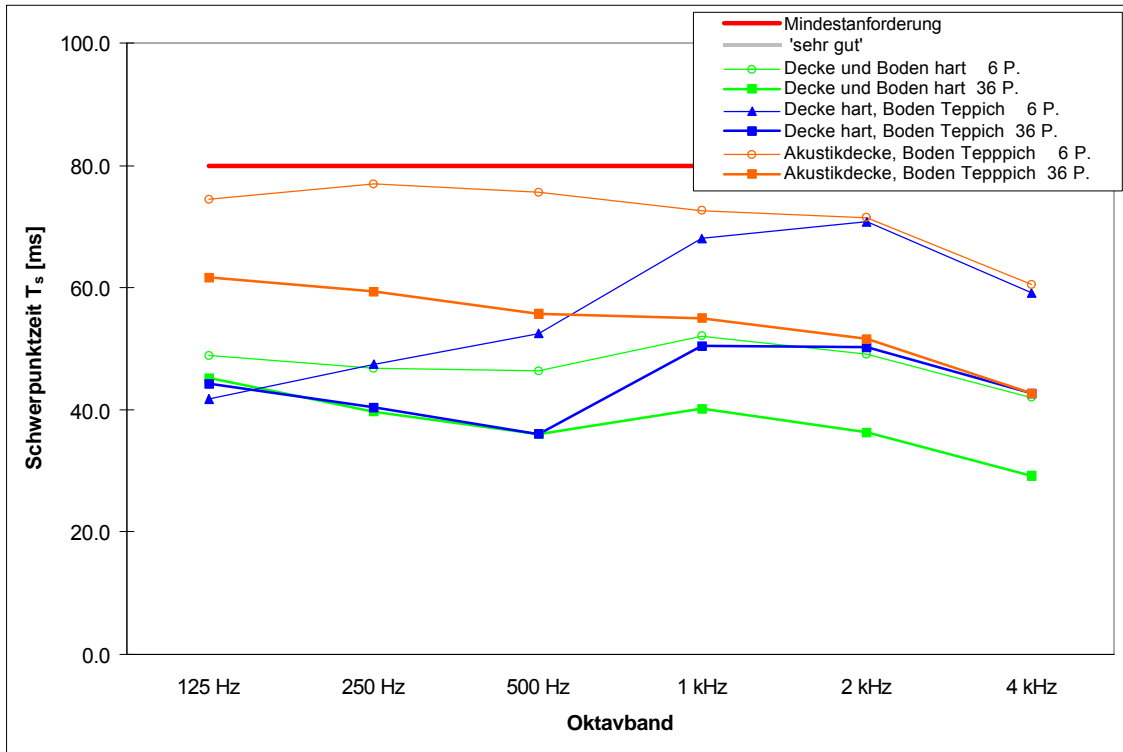
¹³ In der Raumakustik-Literatur wird verschiedentlich darauf hingewiesen, daß in Räumen, die der Kommunikation dienen, der mittlere Bereich der Raumdecke schallhart ausgeführt werden soll. Die hier angeführte Vermutung geht darüber hinaus und bezieht auch den Boden des Raums ein.



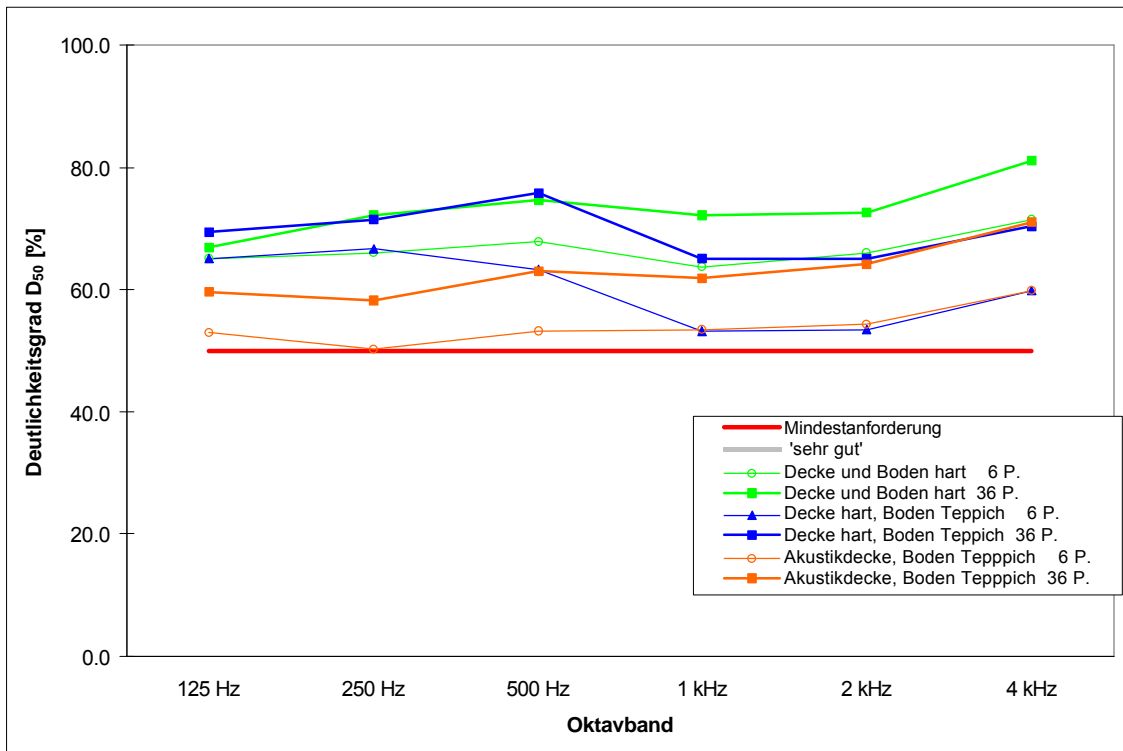
Grafik 4.3 Sabine'sche Nachhallzeiten der synthetischen Raumvarianten.



Grafik 4.4 T-30-Nachhallzeiten der synthetischen Raumvarianten.



Grafik 4.5 Schwerpunktzzeiten der synthetischen Raumvarianten.



Grafik 4.6 Deutlichkeitsgrad der synthetischen Raumvarianten.

In Grafik 4.4 sind in der gleichen Skalierung die aus den Raum-Impulsantworten abgeleiteten T-30-Nachhallzeiten aufgetragen. Während die Werte für die Variante mit schallharter Decke und schallhartem Boden ebenfalls innerhalb des Toleranzfeldes liegen, zeigen die beiden anderen Varianten deutliche Abweichungen nach oben. Diese Abweichungen treten jeweils in denjenigen Oktavbändern auf, in denen horizontale Raumbegrenzungsflächen (Decke oder Boden) stärker absorbieren, bei der Variante mit Teppichboden (Höhen-Absorber) und harter Decke nur in den oberen Oktavbändern und in der Variante mit Teppichboden und Tiefenabsorbierender Akustikdecke in allen Oktavbändern.

Grafik 4.5 stellt die Schwerpunktzeiten¹⁴ der Impulsantworten dar. Auch hier ist ein Unterschied zwischen Varianten mit schallharten und mit absorbierenden Decken und Böden zu sehen. Die Variante mit schallharter Decken und schallhartem Boden zeigt Werte im sehr guten Bereich, wogegen die anderen Varianten in den hohen bzw. in allen Oktavbändern abfallen.

Schließlich sind in Grafik 4.6 die Werte des Deutlichkeitsgrades eingetragen. Hier zeigen sich Einflüsse¹⁵ der Decken- und Boden-Absorption, die analog zu den Effekten in den Schwerpunktzeiten sind, jedoch etwas weniger stark ausgeprägt.

Die Effekte in allen betrachteten Qualitäts-Maßen deuten darauf hin, daß Schall-Absorber an den Wänden des Raums in den betrachteten Räumen bezüglich der Sprachübertragungsqualität wirksamer sind als solche gleicher äquivalenter Absorberfläche an Boden oder Decke des Raums.¹⁶

Dies bedeutet für passiv klimatisierte Räume mit schallharter Decke und Schallabsorbern an den Wänden einen Vorteil gegenüber konventionellen Räumen mit abgehängter und akustisch dämpfender Decke.

¹⁴ Sowohl die T-30-Nachhallzeiten als auch Schwerpunktzeiten und Deutlichkeitsgrade beziehen sich auf im Raum gegenüberliegende Sprecher- und Hörer-Orte analog zu Raum 2.

¹⁵ Selbstverständlich lassen sich auch alle Effekte in Abhängigkeit von den Wand-Absorptionsgraden betrachten, die komplementär zur Boden- und Decken-Absorption variiert sind.

¹⁶ In eine ähnliche Richtung wie die hier gezeigten Resultate weisen auch frühere Untersuchungen. So haben beispielsweise Plomp, Steeneken und Houtgast in einer Simulations-Studie gezeigt, daß unter bestimmten Bedingungen in einem quaderförmigen, allerdings deutlich größeren Raum eine Veränderung des Absorptionsgrades der Decke nur äußerst geringen Einfluß auf die Sprachverständlichkeit hat, der Absorptionsgrad der Wände aber deutlichen Einfluß zeigt. Dieses extreme Ergebnis dürfte aber zumindestens teilweise darin begründet liegen, daß in den Rechnungen alle Reflexionen als ideal spiegelnd angenommen wurden. [Plomp, Steeneken, Houtgast, 1980]

Grenzen des Berechnungsverfahrens

Eingabe-Genauigkeit, Näherungen in der Geometrie

Jede Modellierung erfolgt notwendigerweise mit Näherungen, die entweder dazu dienen, die Komplexität des Modells zu begrenzen, oder die auf der Unkenntnis der genauen Eigenschaften des modellierten Objekts beruhen.

So sind hier die Räume als Quader mit ebenen Oberflächen ohne Vor- und Rücksprünge modelliert. Nischen von Fenstern und Türen sind beispielsweise nicht berücksichtigt. Die sitzenden Personen einschließlich Stuhl werden als diffus streuende Quader angenähert. Auch das Mobilar wird nur angenähert, hier die Tische nur als Tischplatten ohne Beine.

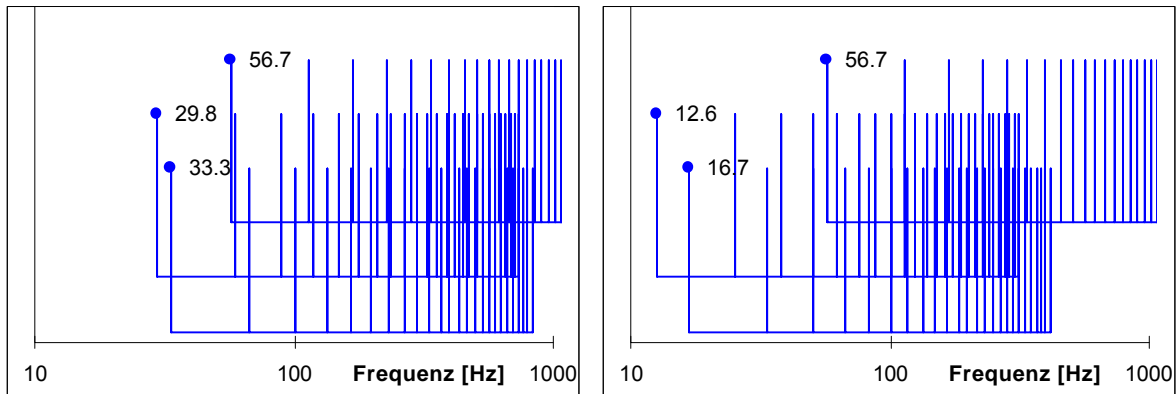
Um den Einfluß von Näherungen in der eingegebenen Geometrie zu untersuchen, ist es sinnvoll, Räume mit verschiedenem Detaillierungsgrad zu modellieren, und die Unterschiede der Resultate auszuwerten. Dafür ist es jedoch notwendig, anders als im vorliegenden Fall real verfügbare Räume zu verwenden, so daß mittels Vergleichsmessung der akustischen Eigenschaften festgestellt werden kann, ob ein höherer Detaillierungsgrad eine bessere Annäherung an die Realität ergibt, oder ob sich eventuell nur Unterschiede in Artefakten der Modellierung zeigen.

Raummoden bei tiefen Frequenzen

Die Simulation in CATT-Acoustic erfolgt, unter der Annahme 'geometrischer Optik' für die Schallausbreitung, mit einer Kombination aus Spiegelquellen-Modell ('image source model', ISM) und modifizierter Strahlverfolgung ('ray tracing')¹⁷. Die Wellennatur des Schalls wird lediglich in einer optionalen Korrektur für die Beugung an Kanten berücksichtigt. Jedoch kann das Anregen von Eigenschwingungen des modellierten Raums in dem Rechenmodell nicht berücksichtigt werden. Dies spielt insbesondere bei tiefen Frequenzen eine wesentliche Rolle, wenn die Wellenlänge nicht mehr klein gegen die Raumabmessungen ist. Bei Wellenlängen in der Größenordnung der Raumabmessungen entstehen in der Regel ausgeprägte Moden (Eigenschwingungen) mit stationären Schwingungsmustern im Raum und entsprechenden Schalldruckmustern auf den Oberflächen. Dies hat zur Folge, daß Schallabsorber frequenzabhängig wirkungsvoller sind, wenn sie sich in Schalldruckmaxima befinden, und entsprechend in den Schalldruckminima weniger wirkungsvoll. Ausgeprägte tieffrequente Raummoden können deshalb wirkungsvoller mit Absorbern nahe der Raumecken und Raumkanten bedämpft werden, da sich dort bevorzugt die Maxima bilden¹⁸. Diese Effekte werden bei der Simulation mit CATT-Acoustic nicht abgebildet.

¹⁷ Die verwendete Methode wird als 'Randomized Tail-corrected Cone-tracing' (RTC) bezeichnet. Eine Beschreibung befindet sich in [CATT, 2000].

¹⁸ Siehe beispielsweise [Fuchs, Zha, 1996], [Fuchs, Zha, Schneider, 1997].



Grafik 4.7 Die Eigenfrequenzen der jeweils 25 tiefsten longitudinalen Moden in den drei Raumachsen der untersuchten Räume, links für das Besprechungszimmer (Raum1), rechts für den Konferenzraum (Raum 2).

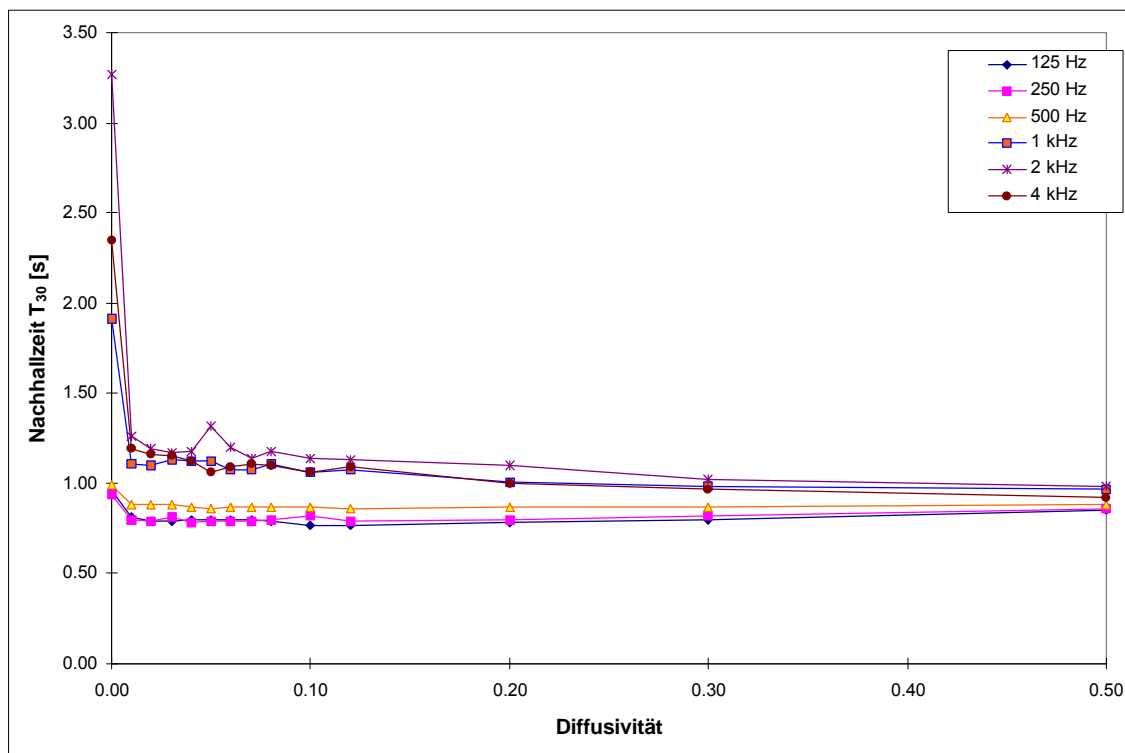
Bei den untersuchten Räumen beträgt die kleinste Abmessung 3 m, entsprechend der halben Wellenlänge des Schalls bei ca. 57 Hz, etwa eine Oktave unterhalb des tiefsten untersuchten Frequenzbands. In Grafik 4.7 sind für die untersuchten Räume die tieffrequenten longitudinalen Modenspektren abgebildet. Die Spektren verdichten sich mit steigender Frequenz zusätzlich durch (nicht dargestellte) diagonale Moden. So entsteht ab etwa 2 Oktaven oberhalb der Grundresonanzen ein zunehmend dichtes, quasi kontinuierliches Eigenfrequenzspektrum, insbesondere da sich die einzelnen Resonanzen infolge der akustischen Bedämpfung des Raums spektral verbreitern. Im Spektralbereich dieses 'Diffusfelds' ist die Berechnungsmethode von CATT-Acoustic eine gute Näherung. Ebenso ist dann, anders als bei ausgeprägten Eigenfrequenzen, die Berechnung bei einer einzelnen Frequenz als Repräsentant für eine Oktave eine angemessene Näherung. Insbesondere bei der untersten Oktave ist jedoch bei den vorliegenden Berechnungen eine vorsichtige Interpretation geboten, da sich wegen fehlender Nachbildung von Raummoden Abweichungen zur Realität ergeben können.

Die Grafik 4.7 zeigt auch, daß bei Raum 1 einige der tiefen Eigenfrequenzen sehr nahe beieinander liegen, so daß sie bei geringfügiger Bedämpfung und damit Verbreiterung zu einem einzigen, sehr ausgeprägten Resonanz-Maximum verschmelzen können. Dies geschieht immer, wenn mindestens zwei Raumabmessungen näherungsweise gleich sind, oder im Verhältnis kleiner Zahlen zueinander stehen. Soweit dies in einem genügend frühen Planungsstadium erkannt wird, ist die angemessene Abhilfe eine Änderung einer der betreffenden Raum-Abmessungen. Anderenfalls können besondere Maßnahmen zur Bedämpfung solcher Resonanzen notwendig werden, beispielsweise abgestimmte resonante Absorber ('Baßfallen') in den Raumecken.

Diffuse Schallreflexion

Für die meisten Materialien und Konstruktionen liegen keine Meßdaten zur Diffusivität der Schallreflexion vor¹⁹. Daher können in den Berechnungen überwiegend nur Schätzwerte für die Diffusivität verwendet werden.

In den vorliegenden Berechnungen wurde eine Diffusivität von 10% als Standardwert angenommen. In Grafik 4.8 ist beispielhaft gezeigt, welchen Einfluß eine Veränderung der angenommenen Diffusivität auf die berechneten T-30-Nachhallzeiten hat. Bei höheren Diffusivitäten bis über 30% verändern sich die Ergebnisse nur geringfügig. Diffusivitätswerte weit unter 10% können dagegen deutlichen Einfluß auf die Ergebnisse haben.



Grafik 4.8 Die Abhängigkeit der T-30-Nachhallzeiten von der Diffusivität der Rauminnenoberflächen, berechnet für die synthetische Raumvariante 'Decke hart, Boden Teppich, 6 Personen'.

Aus der Grafik läßt sich außerdem ablesen, daß die Unterschiede in der Nachhallzeit zwischen den tiefen und den hohen Frequenzbändern mit zunehmender Diffusivität abnehmen. Dies weist darauf hin, daß der Ort der Absorber, hier Tiefenabsorber an den Wänden, Höhenabsorber am Boden, mit zunehmender Diffusivität eine abnehmende Rolle spielt. Allerdings wird dieser Effekt erst bei sehr hoher Diffusivität bedeutsam.

¹⁹ Vgl. [PTB, 2001]

5. Auralisation

Hörproben als Entscheidungshilfe im Planungsprozeß

Mit der Auralisation, also dem Herstellen virtueller Hörproben aus simulierten Räumen, wird hier das Ziel verfolgt, ein Hilfsmittel verfügbar zu machen, mit dem die Mitgliedern eines Planungsteams die akustischen Eigenschaften eines Kommunikationsraums schon vor der Realisierung direkt wahrnehmen können. So wird den Team-Mitgliedern ermöglicht, die akustische Qualität einschätzen, Planungsvarianten zu bewerten und zu vergleichen, ohne daß dafür besondere akustische Fachkenntnisse Voraussetzung sind.

Die Hörproben müssen für diese Funktion einige Voraussetzungen erfüllen :

- Die Hörproben müssen so angefertigt werden, daß die wichtigen akustischen Raumeigenschaften deutlich wahrnehmbar sind. Dies gilt insbesondere für die Unterschiede zwischen Raumvarianten.
- Die Hörproben sollen typischen Hörereignissen bei der geplanten Raumnutzung ähnlich sein (gesprochenes Wort bei Kommunikationsräumen, Sprecher- und Hörer-Orte, Anzahl der Personen und Mobilar im Raum).
- Es muß beachtet werden, ob die akustischen Eigenschaften (mit Qualitätsmaßen für Sprachübertragung bewertet) im Raum gleichmäßig sind. Bei deutlicher Ungleichmäßigkeit müssen unterschiedliche Sprecher- und Hörer-Orte simuliert werden. Dies steigert den Aufwand für Hörtests allerdings deutlich.
- Zu den Hörproben müssen geeignete Fragen formuliert werden, deren Beantwortung zur Auswahl der jeweils geeignetesten Raumvariante(n) führt. Dieses Ergebnis soll weitgehend unabhängig von den Höreigenschaften und vom persönlichen Geschmack der beteiligten Individuen sein, beispielsweise von deren Vorlieben bezüglich Halligkeit oder Trockenheit der Raumakustik.

Die technische Realisierung der Hörproben

In der Auralisation werden Hörproben erzeugt, die über Kopfhörer einen Höreindruck der simulierten Räume ermöglichen. Die Hörproben werden mittels berechneter Raumimpulsantworten erzeugt, die jeweils auf eine Sprecher- und eine Hörer-Position bezogen sind.

Die einzelnen Anteile der Raumimpulsantwort werden für die Auralisation mit der Abstrahl-Richtcharakteristik der Schallquelle gewichtet. Die Sprecher sind hier mit der Richtcharakteristik 'Sänger' der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt²⁰ modelliert.

Weiterhin ist für die Simulation binauralen Hörens ein Kopfmodell erforderlich, das üblicherweise in Form einer Kopf-Übertragungsfunktion (HRTF²¹) verwendet wird. Für diese Untersuchung sind die Daten des am MIT vermessenen KEMAR-Kunstkopfs²² verwendet.

Zudem muß für eine unverfälschte Wiedergabe die Klangcharakteristik des verwendeten Kopfhörers korrigiert werden. Die hier verwendete HRTF des KEMAR-Kunstkopfes ist auf ebenen Frequenzgang im diffusen Schallfeld normiert, so daß bei Verwendung Diffusfeld-entzerrter Kopfhörer²³ keine besondere Korrektur erforderlich ist.

Die Hörproben werden durch eine mathematische Faltung der zuvor gewonnenen Raumimpulsantworten mit Echo- und Hall-frei aufgenommenen Sprach- oder Musik-Signalen erzeugt. In den hier verwendeten Hörproben dienen Aufnahmen einer Frauen- und einer Männerstimme in englischer Sprache als Ausgangssignal.²⁴

Alle Schritte zur Erzeugung der Hörproben können in der Software CATT-Acoustic erfolgen. Zur Vor- und Nachbearbeitung dient eine Audibearbeitungs-Software.²⁵

²⁰ Richtcharakteristik nach [Marshall, Meyer, 1985]. Der Sänger singt etwas nach unten gerichtet. Dies ist auch als Sprechrichtung für am Tisch sitzende Personen realistisch, wenn sie beispielsweise vom Papier ablesen.

²¹ HRTF, Abkürzung für 'head related transfer function'.

²² HRTF des KEMAR-Kunstkopfs im Lieferumfang von CATT-Acoustic; siehe auch [KEMAR, 1994].

²³ Die Diffusfeld-Entzerrung ist in der ITU-Empfehlung 708 [ITU 1990] festgelegt. Geeignete Kopfhörertypen sind u.a. AKG-K 240 **DF**, Beyer DT-770 pro, Beyer DT-990 pro, STAX Lamda Pro.

²⁴ Entnommen aus [Archimedes, 1992]. Bei der Frauenstimme wurden aufnahmetechnisch bedingt übermäßig scharf klingende S-Laute mit einem De-Esser 'entschärft', um einen natürlicheren Höreindruck zu erzeugen. Ein De-Esser ist ein besonderer Kompressor für hohe Frequenzanteile, der in der Studioteknik verwendet wird.

²⁵ Die fertiggestellten Hörproben können zudem im Komprimierungsformat MPEG 1 Audio Layer 3 ('MP3') mit 128 kbit/s gespeichert werden. Gegenüber dem PCM-Format (16-bit, 44.1 kHz, Audio-CD-Format), in dem die Hörproben erstellt werden, reduziert sich damit der Speicherbedarf um mehr als einen Faktor 10, ohne daß die Sprach-Hörproben merklich an Qualität einbüßen.

Die auralisierten Raum-Modelle

Ein zentraler Gesichtspunkt in der Gestaltung der Hörtests war es, die Anzahl der zu untersuchenden Freiheitsgrade und damit die Anzahl der verschiedenen Hörproben auf ein sinnvolles und gut handhabbares Maß zu begrenzen. Dies schien insbesondere notwendig, weil die meisten Probanden nach dem Anhören von 30 bis 50 Hörproben deutliche Ermüdung und nachlassende Aufmerksamkeit zeigten.

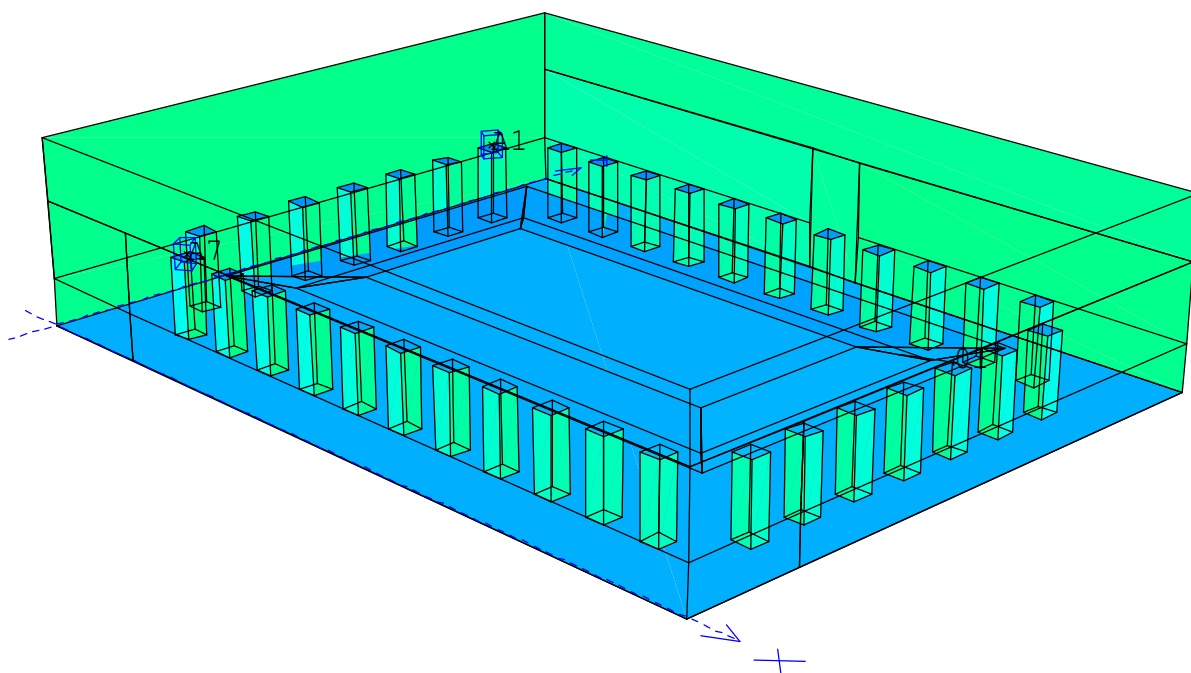
Im Einzelnen wurde folgende Auswahl getroffen :

- Es wurden zwei Sprecherpositionen und eine Hörerposition verwendet, wobei Sprecher und Hörer etwa gegenüberliegend und unsymmetrisch im Raum positioniert sind. Auf weitere Positionen wurde verzichtet, da die Simulationen eine sehr gleichmäßige Schallverteilung im Raum zeigen und somit keine größeren Unterschiede zu erwarten sind. Wegen der geringen Unterschiede zwischen den beiden Sprecherpositionen wurde eine Position der Frauenstimme, die andere Position der Männerstimme fest zugeordnet.
- Alle fünf in den Simulationen detailliert untersuchten Raumvarianten wurden einbezogen: zwei akustisch unbehandelte und für Kommunikation wenig geeignete Basisvarianten, sowie drei akustisch behandelte und geeignete Varianten, darunter auch die 'außer Konkurrenz' einbezogene Variante mit Akustikdecke. Ziel dieser Auswahl war es, nicht nur die Unterscheidbarkeit zwischen eindeutig guten und eindeutig schlechten Lösungen zu erproben, sondern auch festzustellen, ob die kleineren Unterschiede zwischen den drei akustisch geeigneten Varianten auditiv identifiziert werden können. In Tabelle 5.1 sind die Varianten zusammengestellt.
- Die Raumvarianten wurden jeweils mit schwacher Besetzung (6 Personen) und mit starker Besetzung (36 Personen) auralisiert.

Um die Anzahl der Hörproben für einzelne Probanden zu begrenzen, wurden nicht in jedem Test alle möglichen Varianten und Kombinationen verwendet. Ebenso wurden die Hörtests auf den Konferenzraum (Raum 2) konzentriert.

Raum 2 (413 m³)	6 Personen	36 Personen
Basis-Variante 1 (Linoleum-Boden)	Index 20	Index 21
Basis-Variante 2 (Teppichboden)	Index 22	Index 23
'richtig bedämpfte' Variante 1 (Linoleum-Boden)	Index 28	Index 29
'richtig bedämpfte' Variante 2 (Teppichboden)	Index 24	Index 25
Variante mit Teppichboden und Akustikdecke	Index 26	Index 27

Tabelle 5.1 Die in die Hörtests einbezogenen Varianten des Konferenzraums.
Die Indices beziehen sich auf die Simulationsläufe, die den Hörproben zugrundeliegen.



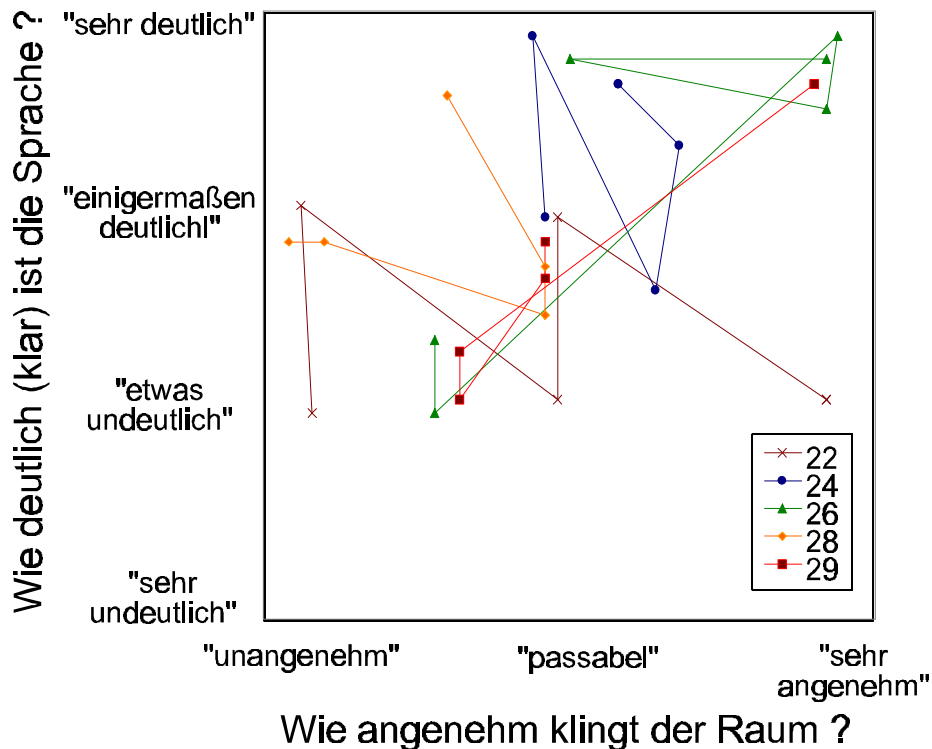
Grafik 5.1 Geometrie des auralisierten Konferenzraums mit 36 'Personen-Quadern'.

Allgemeine Hörtests

In der ersten Testphase wurden mit mehreren Probanden Tests durchgeführt um festzustellen, wie gut sich die akustischen Raumeigenschaften anhand der Hörproben einschätzen lassen, wenn die jeweilige Versuchsperson keine Vorinformation über den Raum hat. Dieser Test war in folgender Weise aufgebaut :

- Die Versuchsperson bekam 5 bis 10 Hörproben aus verschiedenen Raumvarianten in mehreren Durchgängen vorgespielt. Die Versuchsperson wußte nur, daß es in dem Test um ihre subjektiven Eindrücke der Raumakustik geht, hatte aber keinerlei Information über Größe, Geometrie und Ausstattung der Räume, auch nicht, daß alle Hörproben sich auf Varianten eines einzigen Raums bezogen.
- Im ersten Durchgang wurden alle Hörproben nacheinander vorgespielt, um einen Eindruck von der Variationsbreite der akustischen Eigenschaften zu geben. In den weiteren Durchgängen sollte jeder Raum nach jeweils bestimmten Kriterien eingeschätzt werden.
- Im zweiten Durchgang erfolgte eine Einschätzung nach der Deutlichkeit / Klarheit der Sprache und nach der klanglichen Angenehmheit des Raums.
Für die Beurteilung bekommen die Probanden ein zweidimensionales Koordinatenfeld vorgelegt, in dem sie ihre Einschätzung des jeweiligen Raums als Punkt eintragen können. In der folgenden Grafik (5.2) ist das verwendete Koordinatenfeld dargestellt, wobei im Unterschied zu den Original-Diagrammen hier die Eintragungen mehrerer Probanden übereinander gelegt sind. Jede der fünf eingetragenen Datenlinien verbindet die Beurteilungen einer einzigen Raumvariante durch mehrere Probanden²⁶ jeweils mit einer Frauen- und einer Männerstimme. Es ist sofort zu erkennen, daß die individuelle Streuung der Beurteilungen gegenüber den Unterschieden zwischen den Raumvarianten überwiegt. Offenbar führt diese Fragestellung, in der eine 'Benotung' der Deutlichkeit und der Angenehmheit erwartet wird, zu sehr personenabhängigen Ergebnissen und ist daher für die Beurteilung dieser Raumeigenschaften mit Hörproben nicht geeignet.

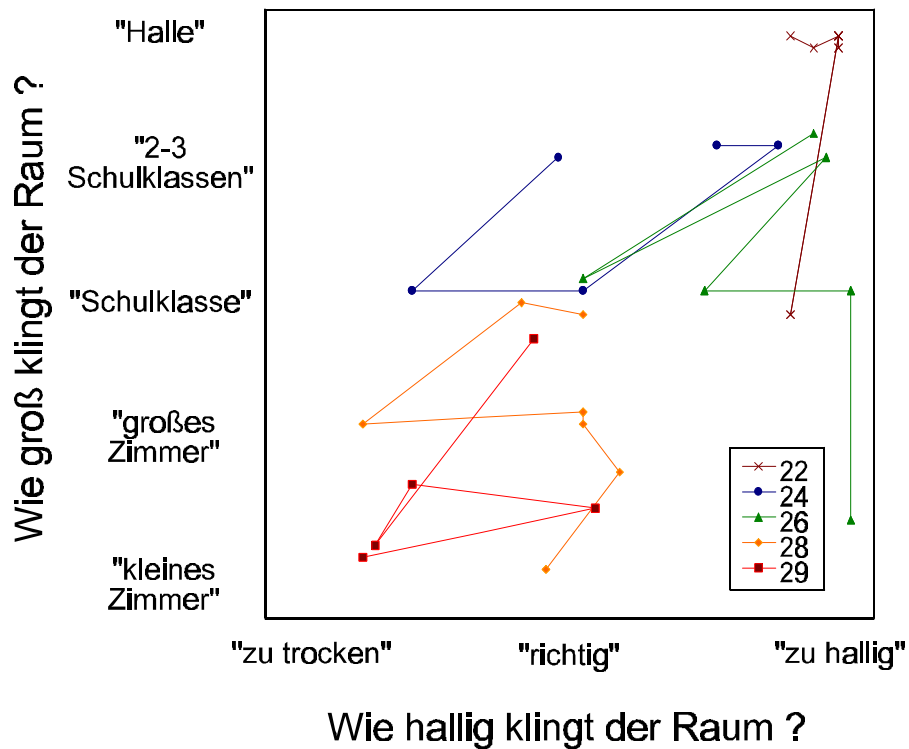
²⁶ Diese Tests wurden mit insgesamt 10 Versuchspersonen durchgeführt, jedoch erhielten nicht alle die gleiche Auswahl von Hörproben, und teilweise waren die Fragestellungen modifiziert. Für die Darstellung sind hier die Probanden mit gleichen Hörproben und gleicher Fragestellung ausgewählt, um die wesentlichen Ergebnisse des allgemeinen Testteils deutlich zu machen.



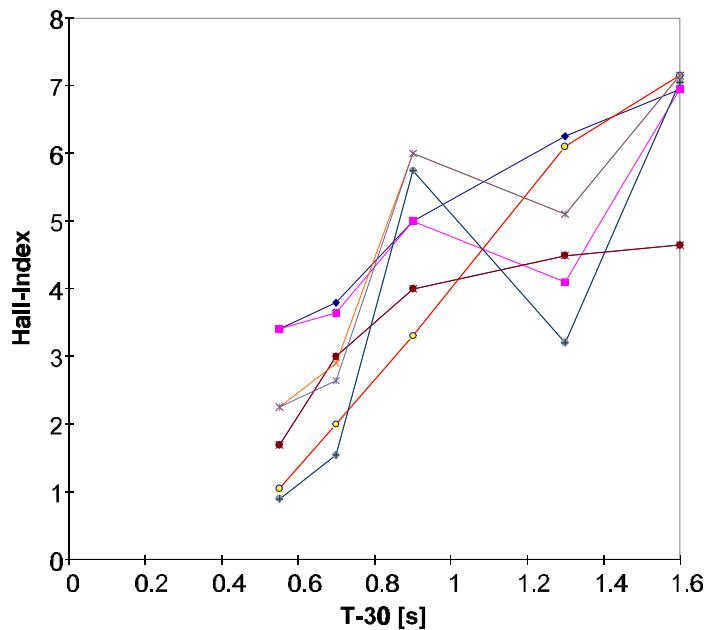
Grafik 5.2 Koordinatenfeld mit den Bewertungen 'Deutlichkeit' und 'Angenehmheit' mehrerer Probanden für fünf Raumvarianten. Die Punkte für jeweils eine Variante sind mit Linien verbunden.

- Der dritte Durchgang diente der Einschätzung der Größe und der Halligkeit der Räume. Analog zum zweiten Durchgang erhielten die Probanden ein Koordinatenfeld, um ihre Einschätzung der Raumgröße und ihre Wahrnehmung der Halligkeit einzutragen. In Grafik 5.3 sind die Ergebnisse mehrerer Probanden eingetragen, wobei jeweils alle zu einer Raumvariante gehörigen Markierungen mit einer Linie verbunden sind. Hier zeigt sich ebenfalls eine große individuelle Streuung, jedoch sind auch unterschiedliche 'Schwerpunkte' der Raumvarianten erkennbar. Bei einzelnen Probanden zeigt sich, daß die unterschiedlichen Nachhallzeiten vorwiegend als verschiedene Raumgrößen²⁷ wahrgenommen werden. Um dies zu verdeutlichen, wird aus den Angaben der Probanden ein Hallindex gebildet. Dazu werden die beiden Achsen des Diagramms jeweils mit einer Skala 0 .. 5 versehen und zu jeder Markierung werden an den Skalen die Koordinaten für Raumgröße und Halligkeit abgelesen.

²⁷ Die Probanden waren nicht darüber informiert, daß alle Hörproben sich auf Varianten eines einzigen Raumes bezogen. Bei bekannter Raumgröße ist diese Fragestellung nicht anwendbar.



Grafik 5.3 Koordinatenfeld mit den Bewertungen 'Raumgröße' und 'Halligkeit' mehrerer Probanden für fünf Raumvarianten. Die Punkte für jeweils eine Variante sind mit Linien verbunden.



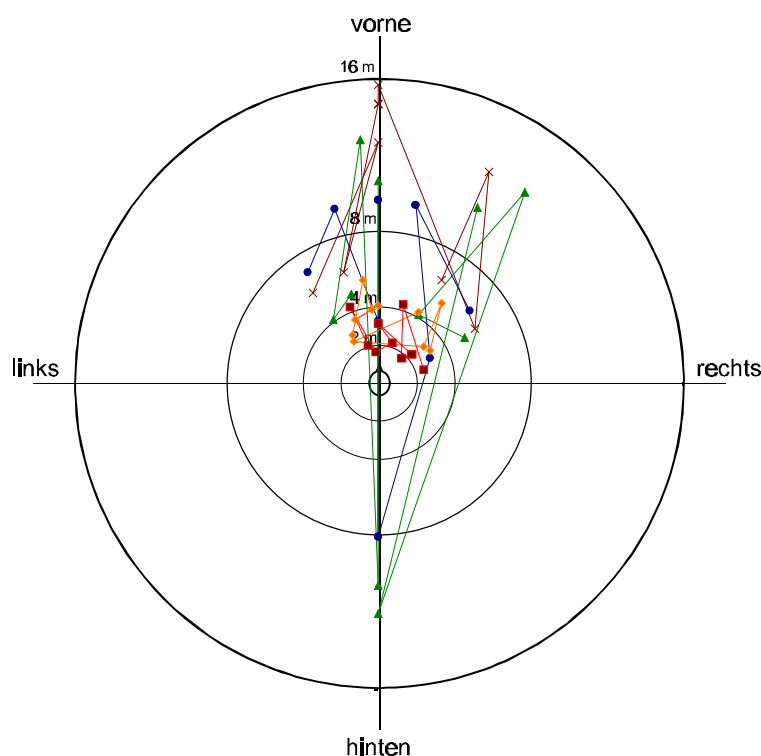
Grafik 5.4 Zusammenhang zwischen aus Angaben mehrerer Probanden berechnetem 'Hallindex' und T-30-Nachhallzeit.

Aus diesen Koordinaten wird für jeden Datenpunkt ein 'Hallindex' gebildet :

$$\text{Hallindex} = \text{Raumgröße} + \alpha \cdot \text{Halligkeit}$$

In Grafik 5.4 sind die mit dem Koeffizienten $\alpha = 0.5$ gebildeten Hallindizes für verschiedene Probanden als Funktion der T-30-Nachhallzeit²⁸ dargestellt. Für alle Personen (alle Kurven) ist ein ähnlicher Verlauf zu sehen, allerdings ist nur bei Einigen der Zusammenhang zwischen 'Hall-Index' und T-30-Nachhallzeit monoton²⁹.

- Im vierten Durchgang wurde die Ortbarkeit der Schallquellen erkundet. Dazu erhielten die Probanden ein Polardiagramm, in das sie die gehörte Richtungen und Entfernungen der Sprecherin bzw. des Sprechers in der Horizontalen eintragen konnten (Grafik 5.5). In einem zweiten Diagramm konnten Abweichungen von der Horizontalen markiert werden.



Grafik 5.5 Gehörte Sprecher-Orte in der Horizontalen bei verschiedenen Testpersonen.

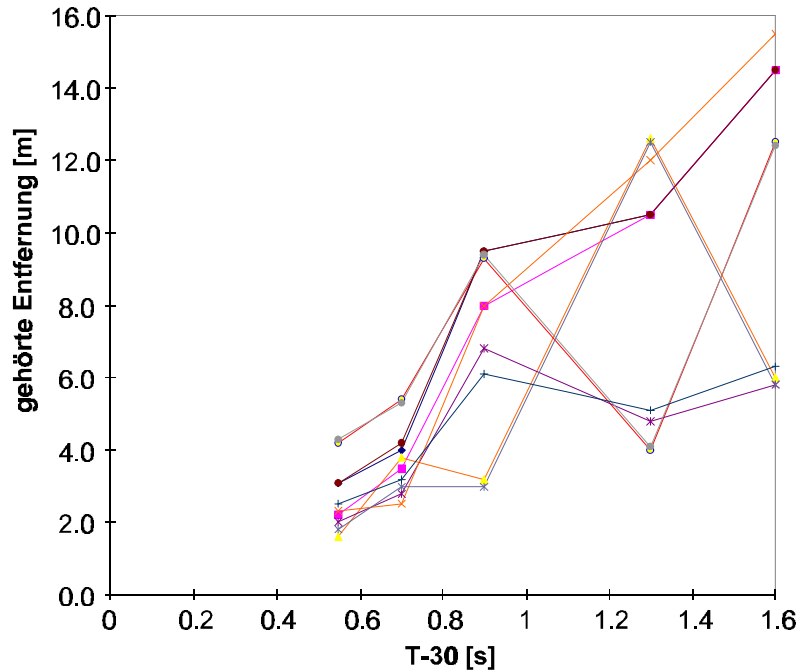
Auch in Grafik 5.5 sind die Ergebnisse verschiedener Probanden eingetragen. Analog zu Grafik 5.4 sind in Grafik 5.6 die gehörten Entfernungen für mehrere Probanden über der T-30-Nachhallzeit aufgetragen. Ein deutlicher Trend ist zu erkennen, daß die gehörte Entfernung mit kleinerer Nachhallzeit abnimmt.

Bei geringeren Nachhallzeiten sind die gehörten Entfernungen deutlich kleiner als die modellierte Entfernung von 11.8 m. Dies weist darauf hin, daß eine gute Bedämpfung in

²⁸ Es wurde der Mittelwert der T-30-Nachhallzeiten für 500 Hz und 1 kHz verwendet.

²⁹ Dieses Ergebnis läßt sich so interpretieren, daß die Probanden die T-30-Nachhallzeit recht gut wahrnehmen können, diese aber überwiegend als gehörte Raumgröße interpretieren, wobei die subjektive Halligkeits-Beurteilung ('zu trocken' bis 'zu hallig') eine Korrektur darstellt. Allerdings sind die 'Eichkurven' dieser 'Nachhallzeit-Bestimmung' individuell verschieden.

Kommunikationsräumen bewirken kann, daß die Personen einander akustisch 'näher rücken', als sie räumlich (und visuell) sind. Es kann vermutet werden, daß dies sich auch positiv auf Kommunikations-Prozesse auswirkt.



Grafik 5.6 Der Zusammenhang zwischen gehörter Sprecher-Entfernung und der T-30-Nachhallzeit des Raumes bei verschiedenen Testpersonen. Die modellierte Entfernung war in allen Fällen 11.8 m.

Abschließend zu den allgemeinen Hörtests soll noch darauf hingewiesen werden, daß Insbesondere bei allen Tests, die die Räumlichkeit betreffen (Raumgröße, Halligkeit, Ortung), es wichtig ist, daß die Probanden die Augen geschlossen halten, damit der Höreindruck nicht von überlagerten Seheindrücken beeinträchtigt und verfälscht wird.

Hörtests in simulierten Planungssituationen

In der zweiten Hörtestphase wird das Ziel verfolgt, eine in der Planung anwendbare Methode zu finden und zu erproben, mit der sich auditiv raumakustisch gute Lösungen für Kommunikationsräume identifizieren lassen.

Die vorangegangenen allgemeinen Hörtests haben gezeigt, daß dort die individuellen Unterschiede in der Beurteilung sehr groß sind und den Effekt der raumakustischen Eigenschaften teilweise oder vollständig verdecken. Offenbar ist die Art der Fragestellungen, in denen versucht wird, raumakustische Eigenschaften *jeweils eines Raums* (direkt oder indirekt) herauszuhören, wenig als Entscheidungshilfe in der Planung geeignet, da die Ergebnisse individuell sehr streuen.

Im zweiten Teil der Hörtests wird daher auf eine 'absolute' Beurteilung der Hörproben vollständig verzichtet. Statt dessen werden A-B-Vergleiche der Hörproben jeweils zweier Varianten durchgeführt. Zu jedem Vergleich wird die Frage :

"Welche Akustik-Variante ist für Kommunikation besser geeignet ?"

beantwortet. Die Probanden werden darauf hingewiesen, daß mit Kommunikation hier eine Besprechung oder eine Konferenz gemeint ist, und daß die Eignung für Kommunikation nicht unbedingt gleichbedeutend mit Gefälligkeit oder Angenehmheit des Klangs ist³⁰. Zusätzlich wird bei jedem Vergleich abgefragt, wie leicht es war, die Entscheidung zu treffen. Die Testperson ist nicht darüber informiert, welche Varianten jeweils verglichen werden.

In dieser Weise wird jede Raum-Variante mit jeder anderen verglichen. Dabei wird auf eine gute Durchmischung geachtet, so daß dieselbe Hörprobe nicht in zwei aufeinanderfolgenden Vergleichen vorkommt. Die Vergleiche erfolgen sowohl mit Frauen- als auch mit Männerstimme. Die gesamte Vergleichsreihe wird je einmal mit geringer und mit starker Besetzung des Raumes durchgeführt.^{31 32}

Die nachfolgende Tabelle (5.2) gibt auszugsweise das Protokoll und die Auswertung einer A-B-Vergleichsreihe wieder. Jede Zeile der Tabelle entspricht einem A-B-Vergleich. Nach dem Anhören wird jeweils in die farblich hinterlegten Feldern eingetragen, welche Hörprobe nach Gehör als besser geeignet erscheint, sowie die Bewertung, wie einfach oder schwierig die Entscheidung war.

³⁰ So kann ein halliger Raum durchaus angenehm klingen, für Kommunikation ist er aber ungeeignet.

³¹ Die Anzahl der Vergleiche nimmt mit der Zahl der Varianten stark zu, wenn jedes mögliche Paar von Varianten miteinander verglichen wird. Bei 2, 3, 4, 5, 6 Varianten sind 1, 3, 6, 10, 15 Vergleiche erforderlich, allgemein bei n Varianten $n*(n-1)/2$ Vergleiche. Zudem werden die Vergleiche 4-mal durchgeführt (schwache und starke Besetzung des Raums, Frauen- und Männerstimme). Um unsicheren Ergebnissen infolge Ermüdung der Probanden vorzubeugen, ist es sinnvoll die Anzahl der Varianten auf 3 bis 4, maximal 5, zu begrenzen.

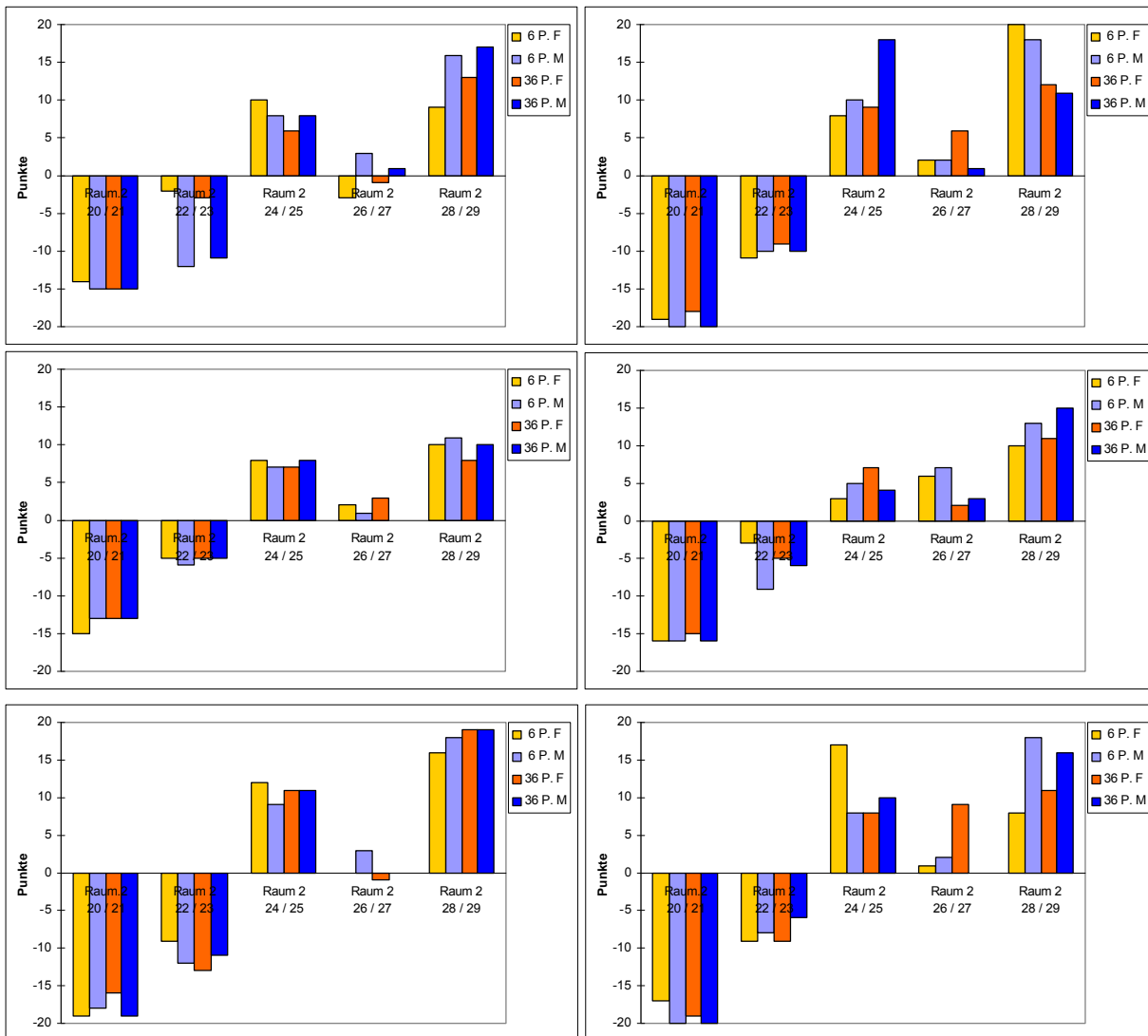
³² Zu Beginn werden den Probanden etwa 10 verschiedene Hörproben nacheinander zum 'Einhören' vorgespielt, ohne daß Fragen dazu gestellt werden. Im nachfolgenden Vergleichstest werden die ersten Bewertungen (2 bis 5) nicht in der Auswertung verwendet, so daß die Testpersonen etwas Sicherheit in der Bewertung gewinnen können, bevor die Auswertung einsetzt.

In der Auswertung wird aus dieser Bewertung eine Punktezahl abgeleitet, die die jeweils bessere Variante positiv und die schlechtere negativ erhält. Die mögliche Punktezahl reicht von 5 Punkten für eine einfache Entscheidung bis 1 Punkt für eine schwierige Entscheidung. Die Punkte werden separat für die Frauen- und die Männerstimme aufsummiert. Die Punktesummen stellen die auditive Bewertung der akustischen Varianten dar.

Hörprobe 1	Hörprobe 2	Stimme	bessere Probe 1 oder 2	1: einfach bis 5: schwierig	Punkte für Variante				
					1	2	3	4	5
Variante 1	Variante 2	Frau	2	2	-4	+4			
Variante 3	Variante 1	Mann	1	1	-5		+5		
Variante 3	Variante 5	Frau	2	4			-2		+2
Variante 4	Variante 5	Mann	2	3				-3	+3
...							
...							
Variante 3	Variante 1	Frau	1	1	-5		+5		
Variante 1	Variante 2	Mann	2	3	-3	+3			
Punkte-Summen		Frau			-18	-10	+8	+5	+15
		Mann			-19	-9	+8	+4	+16

Tabelle 5.2 Beispiel für Protokoll und Auswertung eines A-B-Vergleichs (Auszug). Die Vergleiche mit Frauen- und mit Männerstimme erfolgen hier abwechselnd.

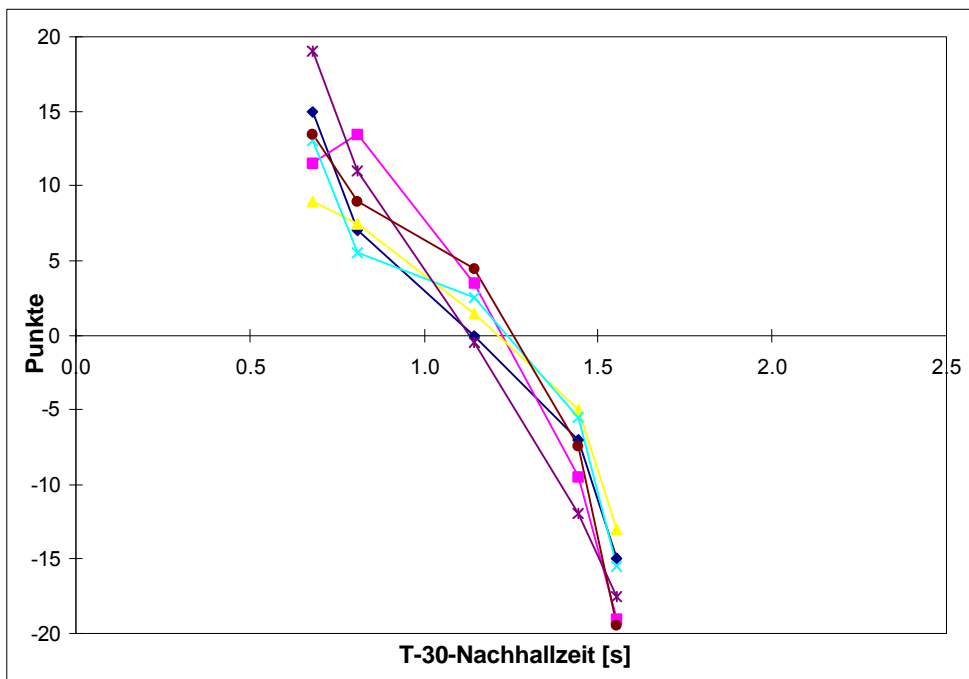
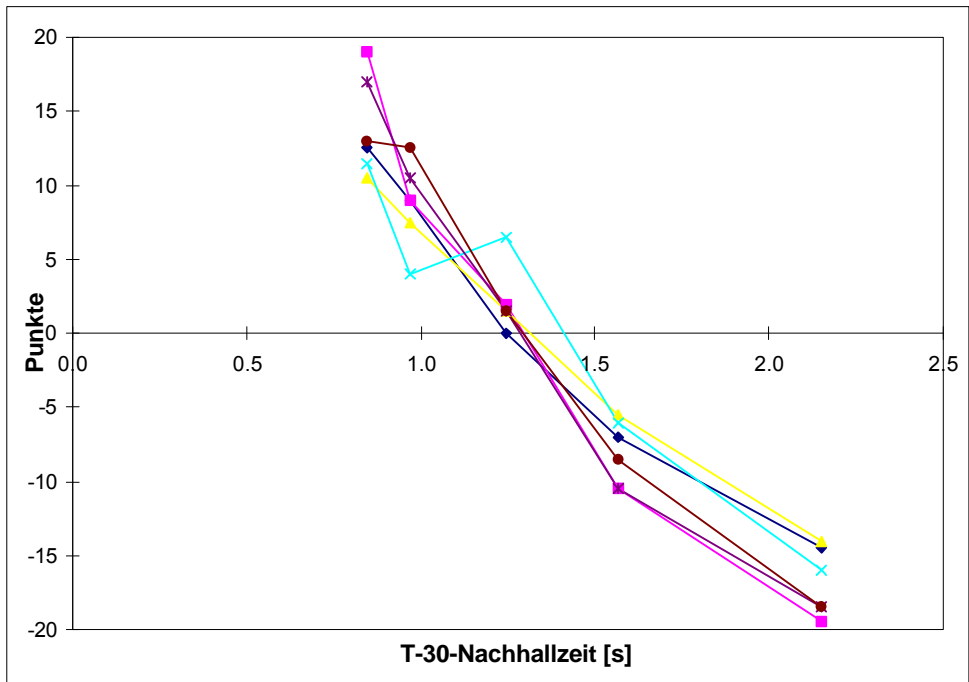
Die Ergebnisse des beschriebenen Test mit 6 Versuchspersonen, die sich gegenseitig nicht beeinflussen konnten, sind in Grafik 5.7 zusammengestellt. Die Resultate aller Probanden zeigen die gleichen Grundmuster, überlagert mit individuellen Unterschieden im Detail. Allen gemeinsam ist die negative Bewertung der akustisch unbehandelten Basisvarianten (erste und zweite von links). Eindeutig positiv bewertet wurden die 'richtig bedämpften' Varianten mit schallharter Decke (dritte und fünfte). Die Variante mit allen Absorbern an den Wänden (5.) wurde von allen Probanden als beste bewertet. Die außer Konkurrenz laufende Variante mit Akustikdecke und Teppichboden (4.) erhält den dritten Platz. Lediglich einige Teilbewertungen weichen individuell von diesem Trend ab.



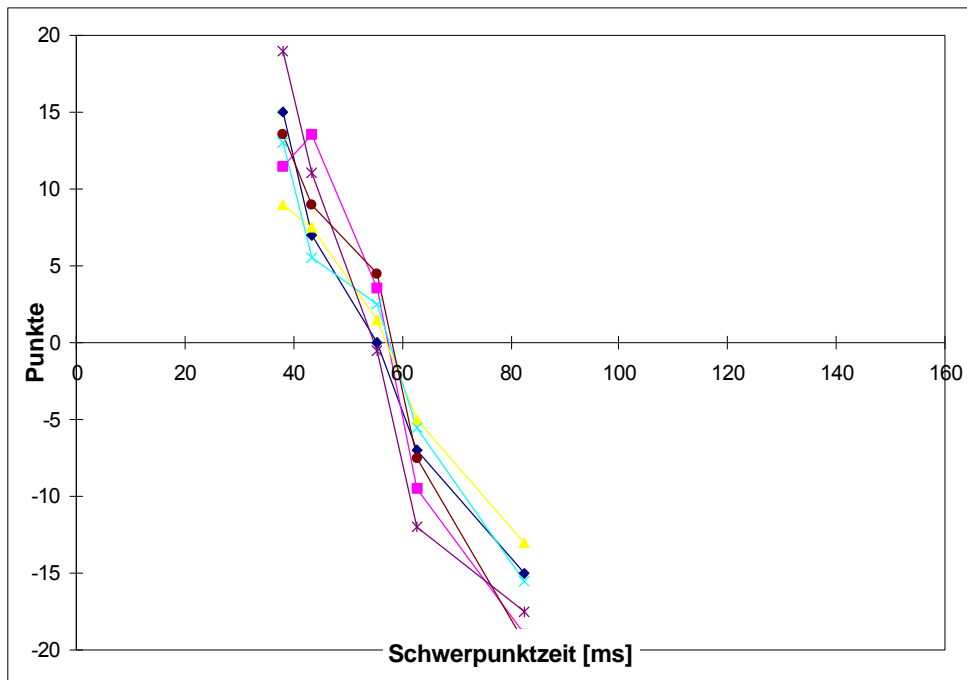
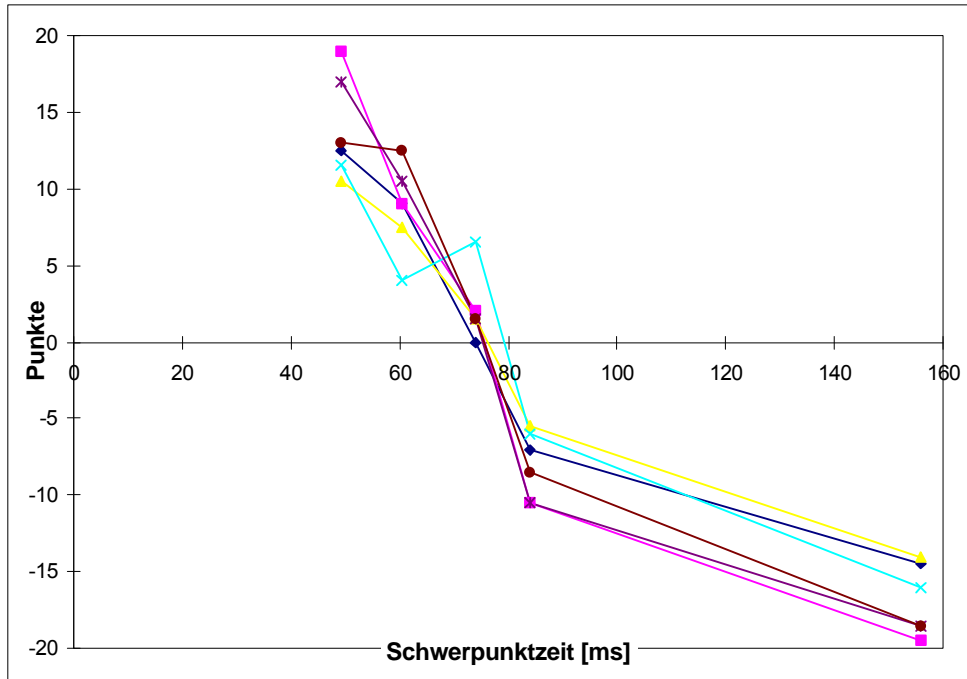
Grafik 5.7 Die auditiven Bewertungen von fünf Varianten des Konferenzraums durch 6 Testpersonen mit der Fragestellung 'Welche Variante ist besser für Kommunikation geeignet?'. Gezeigt sind die Ergebnisse für Frauenstimme (orange) und Männerstimme (blau) jeweils bei 6 Personen (heller) und 36 Personen (dunkler) Besetzung im Raum.

In Grafik 5.8 sind die Punkte-Bewertungen mehrerer Probanden über der berechneten Nachhallzeit der jeweiligen Raumvariante aufgetragen, wobei die Punkte für Frauen- und Männerstimme gemittelt sind. Es zeigt sich ein fast ausnahmslos monotoner Zusammenhang, bei guter Übereinstimmung der Kurven verschiedener Personen. Ein sehr ähnlicher Zusammenhang besteht zwischen der Punktebewertung und der Schwerpunktzeit (Grafik 5.9).

Mit der auralen Bewertung können also akustisch geeignete Lösungen klar von ungeeigneten Lösungen getrennt werden. Innerhalb der geeigneten Lösungen zeigt sich ebenfalls eine Differenzierung, die der numerischen Bewertung weitgehend entspricht. Es können also auch qualitative Unterschiede zwischen den geeigneten Varianten herausgehört werden.



Grafik 5.8 Der Zusammenhang zwischen T-30-Nachhallzeiten und Punktebewertung verschiedener Testpersonen, oben für 6, unten für 36 Personen Besetzung.



Grafik 5.9 Der Zusammenhang zwischen Schwerpunktzeiten und Punktebewertung verschiedener Testpersonen, oben für 6, unten für 36 Personen Besetzung.

Anwendbarkeit und Grenzen der Auralisation

In den vorangegangenen Abschnitten wurde beschrieben, wie mittels auralisierter Hörproben die akustische Eignung als Kommunikationsraum beurteilt werden kann, wenn man in geeigneter Weise vorgeht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Auralisation durchaus als Hilfsmittel bei Entscheidungen in der Planung geeignet ist. Insbesondere wird Personen unabhängig von akustischen Fachkenntnissen die aktive Teilnahme an der Entscheidung ermöglicht³³. Darüber hinaus wird ein direkter sinnlicher Eindruck von der zu erwartenden Raumakustik verschiedener Varianten gegeben, was ebenfalls die Entscheidung für eine der Varianten erleichtern kann.

Es müssen jedoch auch einige Einschränkungen benannt werden: Ebenso wie bei den zugrundeliegenden Simulationen können sich Abweichungen zur Realität ergeben, da die eingegebenen Raummodelle immer auch Näherungen enthalten, wie das Weglassen geometrischer Details oder die Modellierung sitzender Personen als absorbierende und streuende Quader. Zudem sind die angenommenen Diffusivitäten der Oberflächen-Reflexion fast durchweg Schätzwerte. Bei der Auralisation kommt hinzu, daß nur der erste Teil des Nachhalls detailliert aufgrund einzelner Reflexionen berechnet wird, wohingegen in den ausklingenden 'Hallschwanz' eine statistische Näherungsrechnung eingeht.

Bei der Wiedergabe der Hörproben ist eine absolut richtige Einstellung der Abhör-Lautstärke ohne spezielle Kalibrier-Einrichtung kaum möglich. In der Praxis heißt das, die Lautstärke wird nach subjektivem Eindruck eingestellt und lediglich die relative Lautstärke-Kalibrierung der Hörproben untereinander ist richtig³⁴. Für den Vergleich von Raumvarianten reicht diese Art der Kalibrierung offenbar aus.

Wie die gesamte Untersuchung bezieht sich auch die Auralisation primär auf 'normalhörige' Menschen, also Personen ohne nennenswerte Beeinträchtigung des Gehörsinns. Jedoch können Hörbeeinträchtigte die Hörproben in gleicher Weise wie Normalhörige verwenden, solange sie kein Hörgerät tragen. Eingeschränkt gilt dies auch mit einem In-Ohr-Hörgerät³⁵.

Ebenso wie in den Qualitätsmaßen für Sprachübertragung wird bei der hier verwendeten 'passiven' Auralisation³⁶ die Raumakustik ausschließlich aus der Hörer-Perspektive bewertet. Die Bewertung aus der Sprecherperspektive ist nur in einer technisch sehr viel aufwendigeren 'aktiven' Auralisation³⁷ möglich, in der die Möglichkeit besteht über ein Mikrofon in den simulierten Raum hinein zu sprechen und simultan die Raumantwort über Kopfhörer zu hören.

³³ Keine der an den durchgeführten Hörtests beteiligten Personen besaß akustische Fachkenntnisse.

³⁴ Wesentlich dafür ist, daß innerhalb einer Vergleichsrunde mit Varianten eines Raums die Lautstärke-Einstellung nicht mehr verändert wird.

³⁵ Die Ankopplung des Kopfhörers an das Ohr wird verändert, da der Gehörgang mit dem Hörgerät 'verstopft' ist. Dies kann sich auf die Entzerrung des Kopfhörers auswirken.

³⁶ Mit 'passiver' Auralisation ist gemeint, daß die Probanden vorgefertigte Hörproben anhören, also in den simulierten Raum hineinhören können. Bei 'aktiver' Auralisation besteht zusätzlich die Möglichkeit in den Raum hineinzusprechen, so daß die Wirkung der Raumakustik auf die Sprecher erkundet werden kann.

³⁷ Dazu sind eine nahezu verzögerungsfreie Echtzeit-Faltung des Mikrofonsignals mit der Raumimpulsantwort sowie eine absolute Lautstärke-Kalibrierung erforderlich.

In der 'passiven' Auralisation spielt die fehlende Rückkopplung des Raums zum Sprecher ebenfalls eine Rolle. In der realen Sprechsituation passen sich Sprecher in ihrer Lautstärke, Stimmlage, Artikulation, Sprechgeschwindigkeit, usw. an die äußeren Gegebenheiten, insbesondere auch an die Raumakustik an. In der Auralisation werden jedoch für die Herstellung aller Hörproben Sprachaufnahmen verwendet, die im reflexionsarmen ('schalltoten') Raum, also (nahezu) ohne Raumantwort aufgenommen wurden. Dies legt die Vermutung nahe, daß die Sprechweise umso weniger zum Raum paßt, je halliger dieser ist.

6. Résumé

Lösungen für Räume mit schallharter Decke

Die Untersuchung hat für einen Besprechungsraum mit etwa 30 m² Grundfläche und einen rund 140 m² großen Konferenzraum raumakustische Lösungen aufgezeigt, die für Kommunikation gut geeignete Eigenschaften aufweisen. Die Lösungen erlauben sowohl einen Teppichboden als auch einen schallharten Boden. Die Raumdecke ist in jedem Fall schallhart, so daß die thermische Speicherwirkung oder Bauteilaktivierung nicht beeinträchtigt werden.

Akustischen Gestaltungsmöglichkeiten für Kommunikationsräume, die mit passiver Klimatisierung oder thermischer Bauteilaktivierung verträglich sind, sind also gegeben.

Der Vergleich von Raumvarianten mit gleicher äquivalenter Absorberfläche, die aber unterschiedlich an den Umschließungsflächen angeordnet sind, ergibt, daß Schallabsorber an den Wänden eine stärker bedämpfende Wirkung zeigen und zu besserer Bewertung führen, als Absorber an Boden oder Decke des Raums. Schallharte Decken und schallharte Böden bei an den Wänden angeordneten Absorbern sind also eher von Vorteil für die raumakustische Qualität in Kommunikationsräumen, optimale Bedämpfung vorausgesetzt.³⁸

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Untersuchung erfolgte an zwei unterschiedlich großen Räumen, die etwa den unteren und den oberen Größenbereich für Kommunikationsräume markieren. Bei deutlich größeren Räumen wird bei ausreichender Bedämpfung eine unterstützende Verstärkeranlage notwendig, um die Sprecher zu entlasten. Dies liegt außerhalb der Betrachtung in dieser Studie.

Da in den vorgestellten Lösungswegen Wandflächen für die akustische Bedämpfung eine wichtige Rolle spielen, ist die verfügbare Wandfläche ein Kriterium für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Räume. Zum einen steigt bei zunehmender Raumgröße³⁹ die Wandfläche etwa linear, die Grundfläche etwa quadratisch mit den Abmessungen. Dies bedeutet, daß bei zunehmender Raumgröße pro Grundfläche weniger Wandfläche verfügbar ist. Daher ist die Übertragung der Lösungen auf größere Räume begrenzt, abhängig vom nutzbaren Wandanteil und von den Eigenschaften der vorgesehenen Absorber. Insbesondere ist es auch nachteilig, wenn die Wände größtenteils verglast sind, und damit die Möglichkeiten zur Bedämpfung stark eingeschränkt sind^{40,41}.

Bei Räumen mit Größe zwischen den beiden untersuchten Räumen steht einer Übertragung der Lösungen nichts im Wege, falls ein ausreichender Anteil der Wände nutzbar ist. In jedem Fall ist aber eine individuelle Dimensionierung der Absorberflächen mit Berücksichtigung der

³⁸ Diese Aussage bezieht sich direkt nur auf die untersuchten Räume, jedoch kann vermutet werden, daß sie für alle geometrisch ähnlichen Räume gültig ist.

³⁹ Unter der Annahme, daß Länge und Breite des Raums etwa gleichmäßig variieren und die Raumhöhe konstant ist.

⁴⁰ Ein sehr großer Verglasungsanteil in den Außenwänden ist allerdings aus thermischen und energetischen Gründen wenig empfehlenswert (vgl. [Hennings, 1998], [Hennings, Knissel, 2000]).

⁴¹ Vor Glasflächen können zur Bedämpfung transparente mikroperforierte Folien eingesetzt werden.

geometrischen Anordnung erforderlich. Ebenso muß für jeden Raum die vorgesehene Möblierung und Besetzung mit Personen berücksichtigt werden.

Eignung und Grenzen der Berechnungsverfahren

Es zeigt sich, daß aus Raumimpulsantworten abgeleitete, also der tatsächlichen Schallausbreitung nahekommende Nachhallzeiten deutlich von den entsprechenden, nach der Sabine'schen Näherungsformel berechneten Werten abweichen können. Lediglich in den Fällen mit allen Absorbern an den Wänden ergab sich eine annähernde Übereinstimmung. Daraus wird deutlich, daß parametrisierte Nachhallzeit-Berechnungen, wie nach Sabine oder Eyring, die raumakustischen Eigenschaften nur grob wiedergeben. Insbesondere die Anordnung absorbierender Flächen im Raum, kann in ihren Auswirkungen nur in komplexeren Verfahren berechnet werden, die die Schallausbreitung explizit nachbilden.

Auf 'geometrischer Optik'⁴² beruhende Simulations-Verfahren, wie sie auch in CATT-Acoustic verwendet werden, lassen bei tiefen Schallfrequenzen Ungenauigkeiten erwarten. Die, immer wenn die Wellenlänge nicht mehr klein gegen die Raumabmessungen ist, das Schallfeld bestimmenden Moden, können nur in 'wellenoptischen' Verfahren berechnet werden. Diese befinden sich noch im experimentellen Stadium und sind am Markt nicht verfügbar.

Auralisation als Planungshilfsmittel

Die beschriebenen Tests haben gezeigt, daß auralisierte Hörproben durchaus geeignet sind, um in Planungsprozessen Entscheidungen über die raumakustische Gestaltung von Kommunikationsräumen zu erleichtern. So wird für alle Mitglieder eines Planungsteams eine aktive Mitwirkungsmöglichkeit erschlossen, unabhängig von raumakustischen Fachkenntnissen und von der Fähigkeit, akustische Qualitätsmaße zu interpretieren.

Voraussetzungen dafür sind in geeigneter Weise hergestellte binaurale Hörproben, sowie ein Vergleichstest mit mehreren Probanden ohne gegenseitige Beeinflussung, der mit dem beschriebenen Verfahren ausgewertet wird.

Der vorliegenden Untersuchung zufolge liefert ein derartiger Vergleichstest ähnliche Ergebnisse, wie sie aus akustischen Qualitätsmaßen abgeleitet werden können. Eine aurale Beurteilung der raumakustischen Qualität ist mit den beschriebenen Methoden möglich. Wegen der individuellen Streuung der Ergebnisse kann sie jedoch die numerische Bewertung nicht ersetzen, sondern nur ergänzen und mit dem Gehör nachvollziehbar machen. Weitere Tests haben gezeigt, daß gut bedämpfte Raumvarianten akustisch als kleiner wahrgenommen werden, als sie geometrisch sind, und daß bei guter Bedämpfung die Sprecher akustische 'näher' an die Hörer rücken, als der geometrischen Entfernung entspricht. Dies dürfte der Verständigung förderlich sein.

⁴² Mit 'geometrischer Optik' sind Verfahren bezeichnet, deren Berechnungen auf 'Schallstrahlen', 'Spiegelungen' und ähnlichen an die geometrische Optik angelehnten Näherungen beruhen. Mit 'Wellenoptik' sind Rechenmethoden gemeint, die die Wellennatur des Schalls korrekt berücksichtigen und so auch Eigenschwingungen des Raums (Moden) berechnen können.

Weitere Entwicklung

Im Sinne einer weiteren Verbreitung der Methode ist es wünschenswert, daß geeignete EDV-Planungswerkzeuge entwickelt werden, beispielsweise ein gegenüber CATT-Acoustic oder ähnlichen Produkten in der Handhabung vereinfachtes, spezialisiertes⁴³ und weniger kostspieliges Simulationswerkzeug. Sinnvoll ist es auch, die Abwicklung, Protokollierung und Auswertung von Hörtests in ein Planungswerkzeug zu integrieren.

Ebenso ist es sinnvoll, die hier mit Hilfe numerischer Berechnungen gewonnenen Ergebnisse mittels Messungen an realisierten Beispierräumen zu verifizieren. Dazu können in gebauten Räumen die Raumimpulsantworten⁴⁴ gemessen werden. Zusätzlich ist es notwendig, den Raum in der realisierten und vermessenen Form im Simulationsmodell nachzubilden, so daß ein direkter Vergleich möglich ist. Zudem kann mit Hilfe unterschiedlich detaillierter Modelle festgestellt werden, bis zu welchem Detaillierungsgrad eine bessere Annäherung der Modellergebnisse an die Realität erreicht werden kann.

Ebenso kann mit gemessenen Raumimpulsantworten die Realitätsnähe der auralisierten Hörproben überprüft werden, indem sowohl aus Messungen als auch aus Simulation gewonnene Impulsantworten verwendet werden um einander entsprechende Hörproben zu erzeugen⁴⁵.

⁴³ So kann zum Beispiel die Raumgeometrie auf einfache Formen beschränkt werden, und damit zugleich die Eingabe der Geometrie vereinfacht werden.

⁴⁴ Für die Messung eignen sich Maximalfolgen, MLS (Maximum Length Sequence) oder IRS (Inverse Repeated Sequence), binäre Pseudo-Zufallssignale mit weißem Frequenzspektrum, deren Autokorrelation eine Dirac'sche Deltafunktion ist. Durch Rückfaltung der durch den Raum übertragenen Maximalfolge mit dem Originalsignal erhält man die Raumimpulsantwort. Dabei ist ein wesentlich besserer Signal-Rausch-Abstand erreichbar als bei direkter Messung der Raumimpulsantwort auf einen erzeugten Impuls (Knall).

⁴⁵ Direkt im Raum aufgenommene Sprachproben sind für diesen Vergleich nicht geeignet, da sie in der Auralisation nicht genügend genau nachgebildet werden können.

Dank

Die vorliegende Studie konnte entstehen aufgrund einer Zuwendung im Rahmen des Förderprogramms 'Solar optimiertes Bauen' des Bundeswirtschaftsministeriums.

An dieser Stelle sei Prof. Norbert Fisch und Herrn Robert Himmler (Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig) sowie Dr. Hans-Georg Bertram (Projekträger Biologie, Energie, Umwelt) für ihre wohlwollende Unterstützung und Begleitung des Projekts gedankt.

Besonderer Dank gilt auch all denjenigen, die als Testpersonen geduldig und aufmerksam Dutzende von Hörproben angehört haben und damit einen wichtigen Beitrag zum Gelingen erbracht haben.

Anhang

A 1 Inhalt der Auralisations-CD

Track Nr.	Raum	Raum-Nr.	Variante	Stimme	Anzahl Pers.	Sim.-Index
1	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Linoleumboden	Frau	2	10
2	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Linoleumboden	Mann	2	10
3	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Linoleumboden	Frau	12	11
4	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Linoleumboden	Mann	12	11
5	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Teppichboden	Frau	2	12
6	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Teppichboden	Mann	2	12
7	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Teppichboden	Frau	12	13
8	Besprechungszimmer	1	Basisvariante, Teppichboden	Mann	12	13
9	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Frau	2	14
10	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Mann	2	14
11	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Frau	12	15
12	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Mann	12	15
13	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Frau	2	16
14	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Mann	2	16
15	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Frau	12	17
16	Besprechungszimmer	1	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Mann	12	17
17	Besprechungszimmer	1	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Frau	2	18
18	Besprechungszimmer	1	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Mann	2	18
19	Besprechungszimmer	1	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Frau	12	19
20	Besprechungszimmer	1	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Mann	12	19

Fortsetzung nächste Seite

Inhalt der Auralisations-CD, Fortsetzung

Track Nr.	Raum	Raum-Nr.	Variante	Stimme	Anzahl Pers.	Sim.-Index
21	Konferenzraum	2	Basisvariante, Linoleumboden	Frau	6	20
22	Konferenzraum	2	Basisvariante, Linoleumboden	Mann	6	20
23	Konferenzraum	2	Basisvariante, Linoleumboden	Frau	36	21
24	Konferenzraum	2	Basisvariante, Linoleumboden	Mann	36	21
25	Konferenzraum	2	Basisvariante, Teppichboden	Frau	6	22
26	Konferenzraum	2	Basisvariante, Teppichboden	Mann	6	22
27	Konferenzraum	2	Basisvariante, Teppichboden	Frau	36	23
28	Konferenzraum	2	Basisvariante, Teppichboden	Mann	36	23
29	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Frau	6	24
30	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Mann	6	24
31	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Frau	36	25
32	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. an der Wand	Mann	36	25
33	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Frau	6	26
34	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Mann	6	26
35	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Frau	36	27
36	Konferenzraum	2	Teppich, Tiefenabs. Akustikdecke	Mann	36	27
37	Konferenzraum	2	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Frau	6	28
38	Konferenzraum	2	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Mann	6	28
39	Konferenzraum	2	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Frau	36	29
40	Konferenzraum	2	Höhen- und Tiefenabs. a. d. Wand	Mann	36	29

A 2 Hinweise zur Verwendung der Hörproben

Alle Hörproben sind binaural und für die Wiedergabe über Kopfhörer bestimmt. Die Hörproben sind für die Wiedergabe über Diffusfeld-entzerrte Kopfhörer optimiert, und sollten bevorzugt über solche abgespielt werden. Geeignete Kopfhörertypen sind u.a. :

AKG K 240 *DF* ⁽⁴⁶⁾, Beyer DT-770 pro, Beyer DT-990 pro, STAX Lamda Pro.

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.

Die Hörproben zu jeweils einem Raum (Nr. 1 – 20 und Nr. 21 – 40 jeweils untereinander) sind auf gleiche Sprecher-Lautstärke normiert. Beim Vergleich von Hörproben muß die Einstellung der Wiedergabe-Lautstärke unverändert bleiben.

Da eine absolute Kalibrierung der Wiedergabe-Lautstärke nicht ohne besondere technische Hilfsmittel möglich ist, ist es vor einer Vergleichsrunde empfehlenswert, den Lautstärkesteller so einzustellen, daß die lautesten Hörproben (z.B. die ersten beiden eines Raumes) nicht zu laut und die leisesten Hörproben (z.B. die letzten beiden eines Raumes) 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.

⁴⁶ Es gibt auch andere Varianten des AKG K 240, die jedoch nicht Diffusfeld-entzerrt sind.

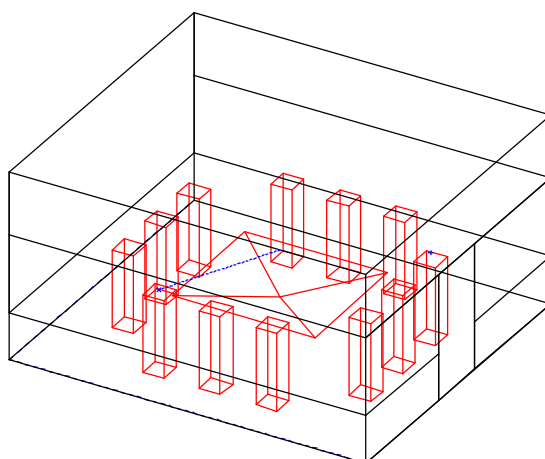
A 3 Literatur und Quellen

- [Archimedes, 1992] Music for Archimedes, Audio-CD, mono.
CD B&O 101, Kopenhagen : Bang & Olufsen, 1992.
- [BAK, 1996] Wuppertal Institut, Planungsbüro Schmitz Aachen: Energiegerechtes Bauen und Modernisieren (Hrsg. Bundesarchitektenkammer).
Basel : Birkhäuser-Verlag.
- [CATT, 2000] B.-I. Dalenbäck: CATT-Acoustic V7.2 User's Manual. Göteborg, 2000.
- [Cremer, Müller, 1976] L. Cremer, H. Müller: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Stuttgart: Hirzel Verlag.
- [Fasold, Veres, 1998] W. Fasold, E. Veres: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis.
Berlin : Verlag für Bauwesen
- [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.
- [Hennings, 1998] D. Hennings: Wie können Büro- und Verwaltungsbauten ohne großen Aufwand thermisch optimiert werden? Deutsche Bauzeitung (db) 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'.
- [ITU, 1990] International Telecommunication Union: Recommendation BS.708 – Determination of the electro-acoustical properties of studio monitor headphones.
- [KEMAR, 1994] Bill Gardner, Keith Martin: HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. Im Internet unter: 'sound.media.mit.edu/kemar.html' 1994/2000
- [Marshall, Meyer, 1985] A. H. Marshall and J. Meyer: Directivity and Auditory impression of Singers. Acustica, 58 (1985) p.130. Auch im Internet unter 'www.ptb.de'.
- [Plomp, Steeneken, Houtgast, 1980] R. Plomp, H.J.M. Steeneken, T. Houtgast: Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. II. Mirror Image Computer Model Applied to Rectangular Rooms. Acustica 46 (1980), 73 - 81.
- [PTB, 2001] Physikalisch-technische Bundesanstalt: Datenbank der Absorptionsgrade und Diffusivitäten. Im Internet unter 'www.ptb.de'.

A 4 Daten und Geometrie der modellierten Räume

Raum 1 (87 m ³)		Konstruktionen	
Bauteil	Fläche	Variante 1	Variante 2
Boden	29.1 m ²	Linoleum-Boden	Teppich-Boden
Decke	29.1 m ²	Decke verputzt	Decke verputzt
Fensterwand Brüstung	4.1 m ²	Wand tapeziert	Wand tapeziert
Fenster	11.2 m ²	Fenster, doppelverglast	Fenster, doppelverglast
Stirnwand unten	3.3 m ²	Zellulosebeschichtung 63 mm	Wand tapeziert
Stirnwand mitte	4.9 m ²	Zellulosebeschichtung 19 mm	Wand tapeziert
Stirnwand oben	5.1 m ²	Zellulosebeschichtung 63 mm	Wand tapeziert
Seitenwände unten	9.1 m ²	Wand tapeziert	Verbundplattenresonatoren
Seitenwände mitte	13.7 m ²	Verbundplattenresonatoren	Wand tapeziert
Seitenwände oben	11.4 m ²	Wand tapeziert	Verbundplattenresonatoren
Tür	2.0 m ²	Holztür, massiv	Holztür, massiv

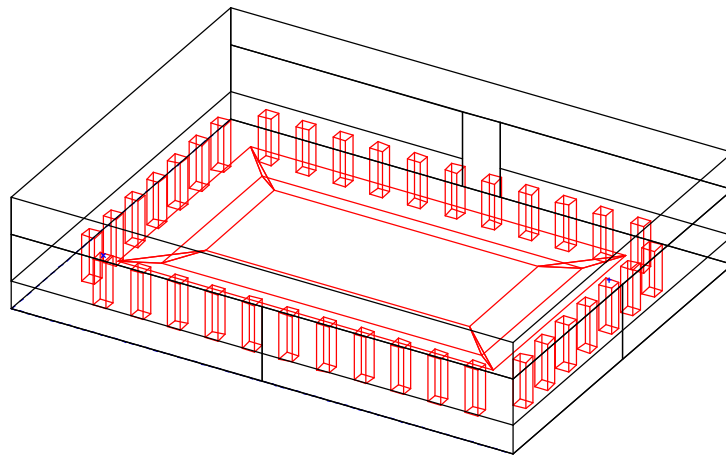
Tabelle A 4.1 Innen-Oberflächen des Besprechungszimmers (Raum 1) in den 'richtig bedämpften' Varianten.



Grafik A 4.1 Die Geometrie von Raum 1 mit Tisch und 12 Personen.

Raum 2 (413 m ³)		Konstruktionen	
Bauteil	Fläche	Variante 1	Variante 2
Boden	137.7 m ²	Linoleum-Boden	Teppich-Boden
Decke	137.7 m ²	Decke verputzt	Decke verputzt
Fensterwand Brüstung	7.7 m ²	Zellulosebeschichtung 19 mm	Wand tapeziert
Fenster	23.0 m ²	Fenster, doppelverglast	Fenster, doppelverglast
Stirnwand unten	6.9 m ²	Zellulosebeschichtung 19 mm	Wand tapeziert
Stirnwand mitte	11.5 m ²	Zellulosebeschichtung 63 mm	Wand tapeziert
Stirnwand oben	10.2 m ²	Fenster, doppelverglast	Fenster, doppelverglast
Seitenwände unten	20.3 m ²	Zellulosebeschichtung 32 mm	Wand tapeziert
Seitenwände mitte	33.8 m ²	Verbundplattenresonatoren	Verbundplattenresonatoren
Seitenwände oben	27.0 m ²	Verbundplattenresonatoren	Verbundplattenresonatoren
Tür	2.0 m ²	Holztür, massiv	Holztür, massiv

Tabelle A 4.2 Innen-Oberflächen des Konferenzraums (Raum 2) in den 'richtig bedämpften' Varianten.



Grafik A 4.2 Die Geometrie Raum 2 mit Tisch und 36 Personen.

A 5 Absorptionseigenschaften der Konstruktionen und Materialien

Bauteil / Konstruktion	Schallabsorptionsgrad					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Linoleum-Boden	0.02	0.02	0.04	0.05	0.05	0.10
Teppich-Boden	0.03	0.09	0.25	0.31	0.33	0.44
Decke verputzt	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Wand tapeziert	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
Fenster, doppelverglast	0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Holztische	0.15	0.13	0.10	0.09	0.08	0.07
Holztür, massiv	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
Verbundplattenresonatoren	0.81	0.73	0.59	0.32	0.25	0.17
Zellulosebeschichtung 19 mm	0.06	0.19	0.55	0.89	0.91	0.93
Zellulosebeschichtung 32 mm	0.12	0.40	0.85	0.99	0.93	0.96
Zellulosebeschichtung 63 mm	0.50	0.81	0.99	0.98	0.92	0.93

Tabelle A5.1 Die in den Berechnungen verwendeten Schallabsorptionsgrade. Alle Daten in Anlehnung an die PTB-Datenbank⁴⁷, mit Ausnahme der Verbundplattenresonatoren⁴⁸. Absorptionsgrade, deren Zahlenwert (aufgrund von Messungen im Hallraum) größer oder gleich 1.0 sind⁴⁹, wurden für die Simulation nach unten korrigiert. CATT-Acoustic akzeptiert Absorptionsgrade bis maximal 0.99.

⁴⁷ [PTB 2001]

⁴⁸ aus [Fuchs, Zha, 1996]

⁴⁹ Aufgrund der Definition des Schallabsorptionsgrades als flächenbezogene Größe sind Werte > 1.0 physikalisch unsinnig; es würde bedeuten, daß mehr Schall absorbiert wird als überhaupt auf eine Fläche auftrifft. Jedoch können sich aufgrund der Messmethoden im Hallraum an endlich großen Proben rechnerisch auch Werte > 1.0 ergeben.

A 6 Die Modellierung der Personen

Personen als Absorber und Streukörper

Die sitzenden Personen wurden einzeln als absorbierende und streuende Quader der Abmessungen 0.34 m x 0.34 m x 1.25 m (L x B x H) modelliert, die aus programmtechnischen Gründen wenige Millimeter über dem Boden 'schweben'. Die äquivalenten Schallabsorptionsflächen der Personen entsprechen einzeln sitzenden Personen nach [Fasold, Veres, 1998]. Eine starke Streuwirkung der 'Personen' ergibt sich bei tiefen Frequenzen aufgrund der Kantenstreuung in CATT-Acoustic und bei hohen Frequenzen durch die angenommenen Diffusivitäten. Damit wird die Quaderform und die Orientierung der Quader im Raum von untergeordneter Bedeutung im Modell.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Schallabsorptionsgrad	0.25	0.36	0.47	0.55	0.61	0.61
Diffusivität	0.70	0.80	0.90	0.99	0.99	0.99

Tabelle A6.1 Die im Personen-Modell verwendeten Absorptionsgrade und Diffusivitäten.

Personen als Schallquellen

Als Schallquelle sind die Personen modelliert mit der Richtcharakteristik 'Sänger' nach Marshall und Meyer⁵⁰. Die Schallquellen befinden sich in 1.30 m über dem Boden und sind zur Raummitte hin ausgerichtet.

Personen als Schallempfänger

Als binaurales Schallempfänger-Modell dient die von Gardner und Martin vermessene Charakteristik des KEMAR-Kunstkopfes⁵¹. Der Schallempfänger ist 1.35 m hoch über dem Boden angeordnet.

⁵⁰ [Marshall, Meyer, 1985]

⁵¹ [KEMAR, 1994]